

# 言語表現による感性量を用いた エントロピー概念 の表現法に関する研究

著者	佐藤 智明
発行年	2015
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2014
報告番号	12102甲第7309号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2241/00129324">http://hdl.handle.net/2241/00129324</a>

言語表現による感性量を用いた  
エントロピー概念の表現法に関する研究

佐藤 智明

システム情報工学研究科

筑波大学

2015年 3月

# 目 次

	頁
第1章 序論	1
1. 1 研究の背景	2
1. 2 本研究の位置づけ	4
1. 2. 1 エントロピー概念の理解と表現方法	4
1. 2. 2 エントロピーの感性的理解	5
1. 2. 2. 1 エントロピーの本質的な意味とクオリアおよびアフォーダンス	5
1. 2. 2. 2 エントロピーの視覚表現	7
1. 2. 2. 3 エントロピーの言語表現	7
1. 3 目的	8
1. 4 論文の構成	9
第2章 エントロピーの理論	11
2. 1 はじめに	12
2. 2 エントロピー概念の誕生	12
2. 3 エントロピーの理論式	13
2. 3. 1 クラウジウスの式	13
2. 3. 2 エントロピーと温度および体積の関係	17
2. 3. 3 ボルツマンの式	19
2. 3. 3. 1 等温変化場における体積とエントロピーの関係	19
2. 3. 3. 2 等積変化場における温度とエントロピーの関係	24
2. 3. 4 強度依存エントロピーと容量依存エントロピー	29
2. 3. 5 情報量の式	30
2. 4 第2章のまとめ	31
第3章 エントロピー概念の言語表現	33
3. 1 はじめに	34
3. 2 教科書や啓蒙書に記されたエントロピーの言語表現	34
3. 3 エントロピーの言語表現の問題点と仮説	34
3. 4 容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを区別することなしに エントロピーを表現する的確な言語表現についての検討	37
3. 5 第3章のまとめ	39

<b>第4章 分子運動動画のエントロピー値と言語表現による感性量との相関分析</b>	<b>4 0</b>
4. 1 はじめに	4 1
4. 2 エントロピー値と言語表現による感性量との相関関係を調べる実験	4 1
4. 2. 1 実験の概要	4 1
4. 2. 2 被験者に見せる分子の運動パターン	4 3
4. 2. 3 比較する言語表現の種類	4 4
4. 2. 4 被験者	4 5
4. 3 実験結果と検討	4 5
4. 3. 1 実験結果	4 5
4. 3. 2 検討事項 1	4 9
4. 3. 3 検討事項 2	5 0
4. 4 第4章のまとめ	5 2
<b>第5章 2 値画像によるエントロピー値と言語表現による感性量との相関分析</b>	<b>5 3</b>
5. 1 はじめに	5 4
5. 2 白黒 2 値画像のエントロピー値算出方法	5 4
5. 2. 1 情報量の求め方に基づいた画像のエントロピー算出方法	5 5
5. 2. 2 熱力学的現象の確率に基づく画像のエントロピー算出方法	5 8
5. 3 エントロピーの算出値と言語によって与えられる感性量との相関性を調べる実験	6 2
5. 3. 1 比較に用いる言葉の選定	6 2
5. 3. 2 実験方法	6 3
5. 3. 3 実験結果	6 4
5. 3. 4 実験結果の検討	6 7
5. 3. 4. 1 エントロピーの計算方法に関する考察	6 7
5. 3. 4. 2 言葉による表現の感性量に関する考察	6 9
5. 3. 4. 3 3 種類の言葉に共通な感性量に順位づけられる 2 値画像	7 0
5. 3. 4. 4 感性量に基づく 2 値画像のエントロピー値計算方法に関する考察	7 1
5. 4 第5章のまとめ	7 2
<b>第6章 熱工学教育におけるエントロピー概念の説明方法の検討</b>	<b>7 4</b>
6. 1 はじめに	7 5

6. 2	分子運動論における熱の本質の表現方法の検討	7 5
6. 2. 1	分子の直線運動を再現したアニメーションコンテンツの概要	7 6
6. 2. 2	熱振動の動きの概念を表現したアニメーションコンテンツの概要	7 7
6. 2. 3	エネルギーの等分配法則を説明する立体視コンテンツの概要	7 8
6. 2. 4	講義内容とコンテンツの実践	8 1
6. 2. 4. 1	講義の概要	8 1
6. 2. 4. 2	コンテンツの実践	8 2
6. 2. 4. 3	エネルギー等分配法則の説明内容	8 2
6. 2. 5	アンケートによる評価および考察	8 4
6. 3	分子運動論におけるエントロピー概念の表現方法に関する検討	8 5
6. 3. 1	熱力学的エントロピー値の算出式と言語表現の関係についての考察	8 5
6. 3. 2	クラウジウスの定義からの誘導式による解説	8 5
6. 3. 3	適切な言語表現の検討	8 7
6. 3. 4	エントロピーを比較する CG アニメーション	8 8
6. 3. 5	講義内容とアニメーションコンテンツ利用方法	9 1
6. 3. 5. 1	実践した講義科目	9 1
6. 3. 5. 2	講義内容及びアニメーションコンテンツの利用	9 1
6. 3. 6	教育効果の検討	9 6
6. 4	第6章のまとめ	9 7
<b>第7章</b>	<b>今後の展望</b>	<b>9 8</b>
7. 1	エントロピーと感性量に関する研究の今後	9 9
7. 2	検討すべき課題	9 9
7. 2. 1	マクスウェルの速度分布を再現したアニメーションによる実験	9 9
7. 2. 2	人間の知覚心理とエントロピーに関する議論	1 0 0
7. 2. 3	時間と空間に対する人間の感性とエントロピー	1 0 2
7. 3	第7章のまとめ	1 0 4
<b>第8章</b>	<b>結 論</b>	<b>1 0 5</b>
8. 1	本論文の概要	1 0 6
8. 2	まとめ	1 0 8

謝 辞	1 1 1
参考文献	1 1 3
研究業績目録	1 2 0

# 第 1 章

## 序 論



## 1. 1 研究の背景

19 世紀に、熱力学第 2 法則としてクラウジウスやボルツマンらによって確立されたエントロピーの概念が、20 世紀になって情報科学や経済学あるいは社会学など他の研究分野に用いられるようになって久しい。特に近年では、環境問題が注目されるようになり、地球温暖化や環境ホルモンあるいは人口問題など、万物は全て混沌へと向かっているといった抽象的な意味で、エントロピーが様々な機会に用いられるようになった<sup>1),2),3),4)</sup>。しかし、エントロピーの概念は、その適応範囲が広いため解釈の仕方も様々で、概念の本質を的確に理解し表現するには労を要する<sup>5),6)</sup>。特にエントロピーに対する熱力学的解釈と情報理論的解釈には大きな違いがあり、熱力学におけるエントロピーと情報理論に基づくエントロピーは同一か否か、という議論は、長年物理学者と情報科学者の間で交わされてきた難題である。「情報理論に基づく情報エントロピーは、熱力学的現象のエントロピーとは数式的な形が等しいだけで、本質的には異なった概念である」という立場を取ったエントロピーのバイブルと言われる著書「Entropy」で知られるファースト<sup>7),8)</sup>と、「物理学のエントロピーは、情報のエントロピーの概念に内包される形のものであり、本質的に全く同じである」とするジェインズ<sup>9)</sup>やブリルアン<sup>10)</sup>との議論があった。後に後者の考え方が勝利することになるが、この議論の解決には、ジェームズ・クラーク・マクスウェルによって提唱された、熱力学第 2 法則が成り立たないとする思考実験（後にウィリアム・トムソンによって「マクスウェルの悪魔」と命名された<sup>11)</sup>）のパラドックスの解決が必要であったが、この議論には 120 年近い年月が費やされた。

**マクスウェルの悪魔のパラドックス**<sup>12)~20)</sup>：気体の入った容器の中にその中を左右 2 つに分ける壁があり、各々の領域の中を気体分子が飛び回っているとする。初めの状態は、左右の領域はともに同じ温度である。すなわち、両方とも速度の速い分子から遅い分子まで様々存在しているが、その速度分布が同じため、平均温度として同じ温度状態であるということになる。2 つの領域を隔てる壁には関所（穴）があり、そこにマクスウェルの悪魔という門番がいる。この悪魔は、ある基準より速度の速い分子については右から左に向かう分子はゲートを開けて通すが、その逆方向の分子は通さない。また、基準より遅い分子は左から右に向かう分子は通すが、その逆方向は通さない、というように、分子の速度を計測した上で判断して門のゲートを開けたり閉めたりしている。この作業を繰り返せば、

いずれ右の領域は基準速度より速い分子に満たされ、左の領域はより遅い分子で満たされる。分子の速度は、内部エネルギーの高低、即ち温度を決める変数であるので、この場合、左の領域の方が、温度が高く、右は温度が低くなることを意味する。また、このゲートを開閉するときに使うエネルギーは微小で、通過した分子が持つエネルギーとは直接は関係しないので、極限まで小さくすることができる。この原理を使えば、非常に小さいエネルギーでより高いエネルギーの高低差を作り出すことができるため、この温度差を使ってカルノーサイクルのような熱機関を動かせば、永久機関が成立してしまう。また、このことは、外部からのエネルギーを必要とせずに、温度の低いところから高いところへ熱エネルギーを移動させることにもなり、これは、「外部から仕事をしなければ（外界に影響を与えなければ）熱は温度の高いところから低いところへ自然に流れる」という熱力学第2法則に反する矛盾を生じることになる。

このマクスウェルの悪魔の議論では、悪魔が、分子の速度と位置の情報を取得し、そのデータを使ってゲートを開け閉めすることにどれほどのエネルギーを使うのかということが議論の焦点となった。この議論の解決には、一度解決されたはずの議論が撤回されて、二度にわたる議論を要した。初期の議論では、1929年にレオ・シラードによって、悪魔が分子の速度の情報を得るために最低限のエネルギーが必要で、これによって周囲のエントロピーを増大させるため、熱力学第2法則には反しない、という考えを発表した<sup>21)</sup>。後に、レオン・ブリュアン<sup>22)</sup>とデニス・ガボール<sup>23)</sup>が、実際に分子のセンシングに光を使った実験を行って証明され、一度は、この考えが指示されたかに思われた<sup>24)~28)</sup>。しかし、チャールズ・ベネットによって、分子の情報を得るためだけではエネルギー上昇に見合ったエネルギーは使われず、可逆的なシステムが可能で、エントロピーは増大しないことが示されて、再び議論が復活した<sup>29),30)</sup>。しかし、後にベネットは、既にそれ以前に発表されていたランダウアーの原理<sup>31)</sup>と呼ばれる理論を使って、最終的に、悪魔が分子の速度の選別作業を続けるためには、前回に取得したデータを消去する必要がある、その消去のためにエネルギーが必要である事を示した<sup>32)</sup>。そして、このエネルギーによって周囲のエントロピーの増大を引き起こさずで、熱力学第2法則に矛盾しないであろうとの議論が交わされて<sup>33)~37)</sup>、これによってこの議論は、一応の終焉を迎えた。そして、この議論の過程から、熱エネルギーにおけるエントロピーも情報理論におけるエントロピーも根本的に同じ性質の

ものであるとする考え方が主流となった。そして更に、近年になって、分子物理学の分野では、分子モーターを使うことで、このマクスウェルの悪魔の仕事と同様のことを実践した例も報告された<sup>38),39)</sup>。これによって、情報量とエネルギーが置き換え可能で等価である事が示され、したがって、熱力学的エントロピーも情報エントロピーも同じものである、とする考えが定着した。これまでの議論の歴史やエントロピーの難しさを考えると、今後再びこの議論が復活する可能性も無いとはいえないが、著者も基本的に、熱力学的現象におけるエントロピーも情報理論におけるエントロピーも同質のものであるという立場で研究を行っている。

これらの議論からも分かるように、エントロピー概念の本質を理解することは非常に難しい。一般的な啓蒙書による説明や、あるいは熱力学の教育においても、学習者にエントロピーの概念を理解させることは困難であり、教育の現場においては古くから様々な方法によって学生の理解を向上させる手法が試みられてきたが、まだ有効な手法が確立されているとはいえない<sup>40)~43)</sup>。そこで、著者は、こうしたエントロピーの難しさに興味を持ち、エントロピーの本質とは何なのか、そして、その本質をどのように表現すれば、エントロピーの概念を分かりやすく説明することができるのか、といったことを課題とした。

## 1. 2 本研究の位置づけ

### 1. 2. 1 エントロピー概念の理解と表現方法

エントロピーの概念は、はじめは、前述のようにクラウジウスやボルツマンによって数式化して定義されたものであり、基本的には、数式によって表すことが、その本質を最も正確に表現できる手段であると考えられる。数式表現については、熱力学や情報理論など、分野は異なるが、それぞれ熱量や情報量を計算するための式があり、これらは理論的な概念を表現する手段として最も一般的であり、熱力学や情報理論の教科書などでの説明に使われる。

エントロピーを表す代表的な数式表現はクラウジウスの式、ボルツマンの式（熱力学、物理学）およびシャノンの情報量（情報科学）である。これらの数式は、エントロピーの概念を理論的に表現しているものであり、概念の理解の基本となるものである。しかし、後述するように、クラウジウスの式、ボルツマンの式およびシャノンの情報量の式は異なる形式となっており、これらの式同士の関係については、前述したように、その概念の解釈については最近まで議論が行わ

れてきた程非常に難しいものである<sup>7)~39)</sup>。このため、学習者がこれらの式を比較しただけで、領域を超えた総合的な概念としてのエントロピーの本質を理解することは難しいと考える。そこで、本研究では、事項 1.2.2 で論ずるように、数式表現による論理的な表現だけではなく、人間の感性に訴えることで、エントロピーに対する理解を深めることができるのではないかと考えた。

## 1. 2. 2 エントロピーの感性的理解

### 1. 2. 2. 1 エントロピーの本質的な意味とクオリアおよびアフォーダンス

エントロピーは第2章で後述するように、熱力学的には温度、圧力および体積と同じように物質の状態を示す状態量として定義されている。温度、圧力および体積は人間の五感で感じることができる。例えば、温度は熱い物や冷たい物を触ることで感じることができる。圧力は、自転車のタイヤの空気を入れる時などに、その時の空気の圧力を、取っ手から得る反発力によって感じることができる。体積については、対象の物質を直接見ることで感じることができる。このように、人間は温度、圧力や体積といった五感で感じられる物理量については疑うことなく、その本質を理解しているか、あるいは、本質を理解しているのかどうかは議論の余地を残すとしても、少なくとも、「理解している」と感じていると考える。エントロピーについても、基本的には状態量であり、もし、温度、圧力および体積と同じように人間の五感で感じることができて、その感覚を使って、これがエントロピーの正体である、と示すことができれば、エントロピーの本質、あるいは本質的な概念を理解したと感じることができるのではないかと考える。しかし、そもそも人間がエントロピーを感じることができるのかどうか、ということ自体が明らかにはされているとは言えない。

人間の感性と物との関係、あるいは人間の感覚と概念との関係については、それぞれネルソン・グッドマンやデイヴィッド・チャーマーズ等によって広まった「クオリア」<sup>44)~46)</sup>や、ジェームス・J・ギブソンによって提唱され、ドナルド・ノーマンによって広まった「アフォーダンス」<sup>47),48)</sup>のような、心理学や認知科学分野の概念がある。

**クオリア**：精神的な反応のうち、内観によって知られうる現象的側面のことを言い、それを構成する個々の「質」や「感覚」のことをいう。日本語では感覚質と訳される。例えば、「あのイチゴの赤い感じが良い」や「竹を割ったような性格」、

「スキッとした性格」といったような、具体的に説明するよりも、他の物・事象や音声にたとえることで、その物や事象が持つ感覚的な状態や質感を伝えることができるが、一般的には、そうした感覚的な質感のことをいう。しかし、この概念は、元は哲学分野で「意識」として考えられていたものであったが、後に、心理学、認知科学および神経科学などのサイエンス分野でも使われるようになった経緯もあり、解釈のされかたも様々で、この概念自体も定まったものではない。

**アフォーダンス**：環境が生体（人間を含む動物）に対して与える「意味」あるいは「概念」のことを言い、人間工学、生態心理学の基底的概念であり、「与える、提供する」という意味の英語 *afford* からの造語である。例えば、人間がドアのノブ（取っ手）を見たときに、その形状がよほど特別なものでない限り、それを見ただけで「これは回してドアを開けるもの」だと認識する。こうした認識は、人間が生活の上でいろいろな形のドアノブを経験する上で得られた「概念」あるいは「意味」である。この概念についても、提唱者であるギブソンと、工業デザイン分野への応用によってこの概念を世界に広めたノーマンとで、概念に対する考え方が異なっており、定まったものではない（ノーマンによって広まった概念は、ギブソンの唱える「意味」ではなくて、それによって、見た者の行動を「誘導するもの」と解釈されている。後にノーマンはその違いを認めている）。

このように、クオリアやアフォーダンスといったこれらの似通った考えは、本来、曖昧模糊とした物や概念について、別の言葉や異なる感覚器からの情報の助けによつて的確に理解できる意味や概念の存在があるということを指すが、著者は、エントロピーもこのような存在の一つなのではないかと考える。そこで、本研究では、前述のように、エントロピーの理解のために、数式による論理的な表現に加えて、人間の感覚に訴える他の方法を使うことで、捉えにくいエントロピー概念の「本質的な意味」をよりの確に理解することができるのではないかと考えた。そこで、本論文においては、まず、人間の感性とエントロピーの関係について明らかにすることを目指した。そして、エントロピーの概念そのもの、あるいはエントロピーの変化をどのように表現するかということに的を絞った。

（尚、本論文の議論において、エントロピーの本質が、ここで言う「クオリア」と「アフォーダンス」のどちらに属するかということについては、そもそも、上述のように、これらの概念自体があいまいなものであるため、あえて議論をせず、

これらの用語は用いずに，エントロピーの「本質的な意味」と記す）。

### 1. 2. 2. 2 エントロピーの視覚表現

視覚表現については，近年は，マルチメディア技術によって様々なことができるようになった．その中でも学習者が直接操作し，パラメータを変化させることでインタラクティブに反応するアニメーションコンテンツは，工学や理学系の分野で現象を理解させる教育において教育効果が高いことが分かってきている<sup>49),50)</sup>．特に物理や工学分野における物理法則は数値シミュレーション化しやすく，インターアクティブなコンテンツを作成しやすく，著者らの他の研究でもその効果が確認されている<sup>51),52)</sup>．そこで本研究では，エントロピーを視覚的に表現することを考えた．しかし，エントロピーをこのようなマルチメディアで表現するためには，エントロピーの変化を表示画像によって正確に表現する必要がある．そのためにはどのような画像表現がエントロピー表現に適しているかを考える必要があり，更に学習者がその画像から得る感性量（心理量）と画像のエントロピー値との間の関係を明らかにしておく必要がある．

エントロピーと視覚による感性量との関係については，認知科学あるいは画像情報通信関係の分野において盛んに研究されており，エントロピー値と視覚による感性量との間に高い相関性があることが認められてきている．他者の研究では，物体の形状認知と画像情報エントロピーに高い相関性があることを示した佐藤ら<sup>53),54)</sup>の研究や，視覚情報の物理量と認知情報量との関係について画像情報エントロピーの大きさが視覚探査（ある表示情報から特定の情報を選び出す反応速度）に相関があることを明らかにした板谷ら<sup>55)</sup>の研究がある．しかし，これまでの研究は，いずれも画像情報量とその情報に対する認知感度に関する研究が主であり，エントロピーの「本質的な意味」についての認知と画像のエントロピー値についての研究は見あたらない．そこで本研究では，エントロピー値の変化に対応した状態となる分子運動のアニメーションを使って，その現象を直接被験者に見せたときにどのように感じるのかということを，次目 1.2.2.3 で論ずるように，言語表現による感性量との比較によって明らかにすることを検討した．

### 1. 2. 2. 3 エントロピーの言語表現

人間が温度や体積や圧力について感覚器官を通して感じ取るのと同じように，エントロピーの変化について，視覚を通して感じることをできるかどうかを解明するためには，その感覚や感性を表現できる他の表現方法が必要で，それは言語

表現だと考える。例えば、温度については、「熱い」「冷たい」、体積については「大きい（広い）」「小さい（狭い）」、更に圧力については「強い」「弱い」等のように言語による表現を使うことで人にその量を認知あるいは理解させることができる。これらの状態量については、人間の五感の神経で感じた感性量を言語表現で具体化することでその量を論理的な思考の中で使うことができると考える。そういう意味では、学習者に物理的な理論や概念を学ばせる上で、その概念をどのような言葉で表現するかということは非常に重要だと考える。エントロピーの概念を表現する言語表現としては、「乱雑さ」「無秩序さ」および「曖昧さ」など、多くの言語表現がエントロピーの啓蒙書などに使われている。これらの言語表現は、それぞれについて、特定の事象や現象について理論的解釈に基づく根拠があって使われていることが多いが、一方で、これらの言語表現が、エントロピーの「本質的な意味」を完全に表現しているのかどうかといった検討は十分に行われているとは言えない。また、その言葉一つで、エントロピーの本質的な意味を理論的にも、感性的にも表現できる言葉があれば、それが最も有効な表現手段だと考える。そこで本研究では、これまでのエントロピーを表現する言語表現についてその問題点を検証すると共に、エントロピーの本質的な意味をよりの確に表現できる言語表現を見つけることも大きな課題の1つとした。

### 1. 3 目 的

上述したように、エントロピーというものは、物理学者や情報科学者の界限でも長年議論しなくてはならないように、非常に難しい概念および意味を持っていると考える。そして、そこで議論されてきた課題は、未だ完全に解決されているとは言えず、エントロピーの「本質的な意味」については今後も議論する余地があると考えられる。そして、それはクオリアのように、言語表現や視覚表現などによって、感性に訴えることで理解が深まるものであるかもしれないし、アフォーダンスのように、それに対するいろいろな表現や様々な経験を通して、初めて理解できる概念・意味であるかもしれないと考える。

「クオリア」や「アフォーダンス」があいまいな概念であるのと同じように、エントロピーの「本質的な意味」も、それ自体があいまいで分かりにくいものである可能性が高い。更に、エントロピー自体が「曖昧さ」や「混沌」といったものを意味するものであるため、「本質的な意味はこれである」、と明確に結論付けることは非常に難しいと考える。そのため、このことに関しては、本論文の範囲

内で最終的な結論を得られないことができない，もっと広く，恒久的なテーマであると考え．そこで本論文では，エントロピーの言語表現による感性量と視覚表現による感性量との関係に焦点を絞り，その関係を明らかにすると共に，それによってエントロピーの本質的な意味を表現する手法を考えて，それを実践することを目的とする．

#### 1. 4 論文の構成

本論文の構成を以下に示す．まず，第1章である本章では，エントロピーの概念の解釈を巡る議論に関する背景について論じ，エントロピーの「本質的な意味」の広範囲な研究の中で，本論文が扱う範囲および目的について記した．

第2章では，エントロピーの理論の概要について，クラウジウス，ボルツマン等の数式の説明を中心として，エントロピーの数式表現とその意味について論ずる．

第3章では，これまで啓蒙書や教科書などで用いられてきたエントロピーの変化を表現する言語表現にはどのようなものがあるかの調査と，それらの言語表現が持つ問題点について議論する．

第4章では，視覚表現と言語表現による感性量に着目し，エントロピー値をパラメータとして分子の速度が変化する分子運動のアニメーションを被験者に見せて，あらかじめ選んだ数種類の言語表現について，言語表現ごとに，2つの映像のどちらがより強く感じるかを調べる一対比較実験を行った．そして，分子運動アニメーションのエントロピー値と言語表現による感性量との相関分析を行った結果について議論する．

第5章では，視覚表現として，白黒のドットの2値画像を用いて，被験者に，様々な2値画像パターンの中から，それぞれの言語表現について，どちらの画像がより強く感じるかを選ばせる一対比較実験を行った．そして，2値画像から計算によって求まるエントロピー値と言語表現による感性量との相関分析を行ったその結果について議論する．

第6章では，第4章までに得られた結果を，教育分野への応用する一例として，熱工学における熱力学の授業において実践した例を紹介する．本授業では，数式を用いた論理的な説明と同時に，前章までで得られた，エントロピー概念の表現として比較的に適していると考えられる言語表現を使いながら，同時に様々な分子運動アニメーションを見せながら説明することで，受講者の論理的な思考と感



性を同時に使ってエントロピーの本質について学ばせる方法を試みた.

第7章においては, 本研究と, その周辺領域におけるエントロピーと感性量に関する研究の今後の展望について議論する.

第8章においては, 本論文の概要について記し, 得られた知見と結果についてまとめる.

## 第2章

# エントロピーの理論

## 2. 1 はじめに

本論文では、熱力学的エントロピーの理論に関する議論が中心となるが、本研究は、複数の研究領域にまたがった学際的な性質を持つため、本論文の読者も様々な背景を持った者が読むことが予想される。その中には、必ずしもエントロピーに関して十分な知識を持っていない者も想定されるので、本章では、基本的な熱力学的エントロピーの理論について簡単な解説を行う。解説方法の参考とした書物は、エントロピーのバイブルとされるファーストによる「Entropy」<sup>56)</sup>、非平衡熱力学の研究で知られる現代熱力学の大家であるイリヤ・ブリコジンの「Modern Thermodynamics」<sup>57), 58)</sup>、アンドリーズ・グレベンらの「Entropy」<sup>6)</sup>、ディリブ・コンデプディの「Introduction to Modern Thermodynamics」<sup>59)</sup>およびその他の統計力学の啓蒙書<sup>60)~66)</sup>であるが、一部独自の解説方法も用いた。尚、本章の解説は、後の第6章「熱工学教育におけるエントロピー概念の説明方法の検討」の授業において実践した説明内容でもある。

## 2. 2 エントロピー概念の誕生

エントロピーの概念は、19世紀に、熱力学第2法則としてルドルフ・クラウジウス（1822～1888年）やルートヴィッヒ・ボルツマン（1844～1906年）らによって確立された熱力学概念である。ジェームス・ワット（1736～1819年）の功績によって飛躍的に発達した蒸気機関によって、エンジンとしての熱機関は世の中に認められるようになったが、理論的な裏付けは確かなものではなかった。熱機関に関する最初に理論的な検討を行ったのはニコラ・レオナール・サディ・

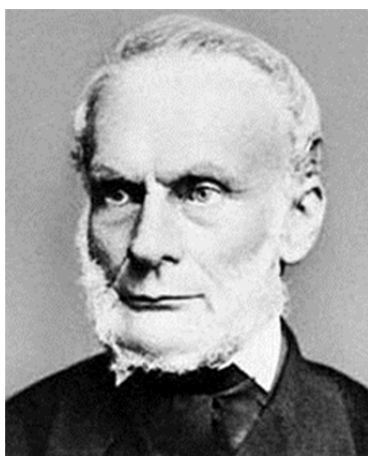


図 2.1 ルドルフ・クラウジウス

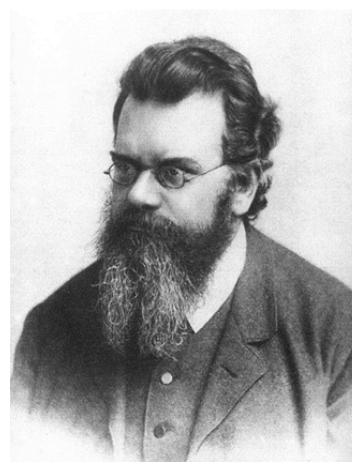


図 2.2 ルートヴィッヒ・ボルツマン

カルノー（1796～1832 年）であるが、彼は、与えた熱量に対する仕事の比率を意味する熱効率の概念を確立させた。そして、熱機関には熱効率の上限があり、それは低熱源と高熱源の温度によってのみ決まることを突き止めた。そして、理論上最高の熱効率を有するサイクルは、等温加熱・冷却と断熱膨張・圧縮の組み合わせで囲まれるサイクルで、後にカルノーサイクルと呼ばれる理論上の熱機関の存在を示した。その後、このカルノーサイクルの熱効率の理論によって、可逆サイクルと不可逆サイクルの議論が起こり、その不可逆性の指標としてのマクロ的視点によるエントロピーの概念がクラウジウスによって定義された。そして、そのエントロピーは状態量であることが導き出されたが、「これがエントロピーである」という現象そのものを示すことはできなかった。後に、ボルツマンによって、ミクロ的な視点からエントロピーの概念が再定義された。これによって、エントロピーは分子の位置的な存在確率と分子運動の微視的状态量に基づくものであることが明らかにされた。

## 2.3 エントロピーの理論式

### 2.3.1 クラウジウスの式

エンジンとしての熱機関の熱効率  $\eta_{th}$  は、与えた熱量に対する仕事量の比率として、以下の式で定義される。ここで、 $W$  は仕事量、 $Q_1$  は加熱量（高熱源から加熱）、 $Q_2$  は排熱量（低熱源へ廃熱）。

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2.3.1)$$

更に、可逆断熱変化を想定すると、高温側温度  $T_1$  および低温側温度  $T_2$  とすると加熱量と排熱量との間に以下の関係がある。

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.3.2)$$

これより、可逆過程における熱量と温度の間に次の関係が導かれる。

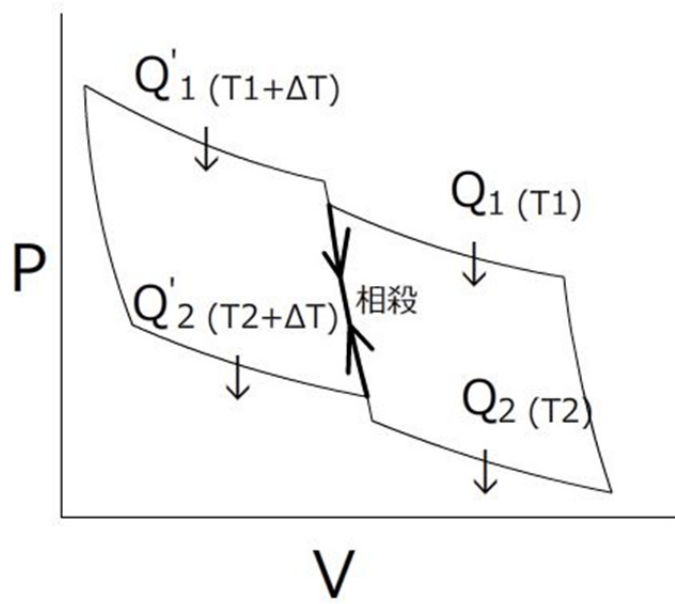


図 2.3 2つのカルノーサイクルの複合サイクル

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{および} \quad \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0 \quad (2.3.3)$$

ここで、2つの等温加熱過程と、2つの断熱過程から成る理想的な熱機関とされるカルノーサイクルのサイクル図を考え、これらが複数連結した複合サイクルについて考える。図 2.3 には、高熱源から熱量  $Q_1$  が温度  $T_1$  で一定の状態流入し、低熱源に熱量  $Q_2$  が  $T_2$  で一定の状態放出されるカルノーサイクルと、そのサイクルと温度がそれぞれ  $\Delta T$  だけ異なる状態で作動する別のカルノーサイクルを繋ぎ合わせたサイクルを示した。この場合、断熱変化部分の仕事量が相殺される。この複合サイクルより、以下の式のような関係が導かれる。

$$\left( \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \right) + \left( \frac{Q'_1}{T_1 + \Delta T} - \frac{Q'_2}{T_2 + \Delta T} \right) = 0 \quad (2.3.4)$$

これより、

$$\left( \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q'_1}{T_1 + \Delta T} \right) - \left( \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q'_2}{T_2 + \Delta T} \right) = 0 \quad (2.3.5)$$

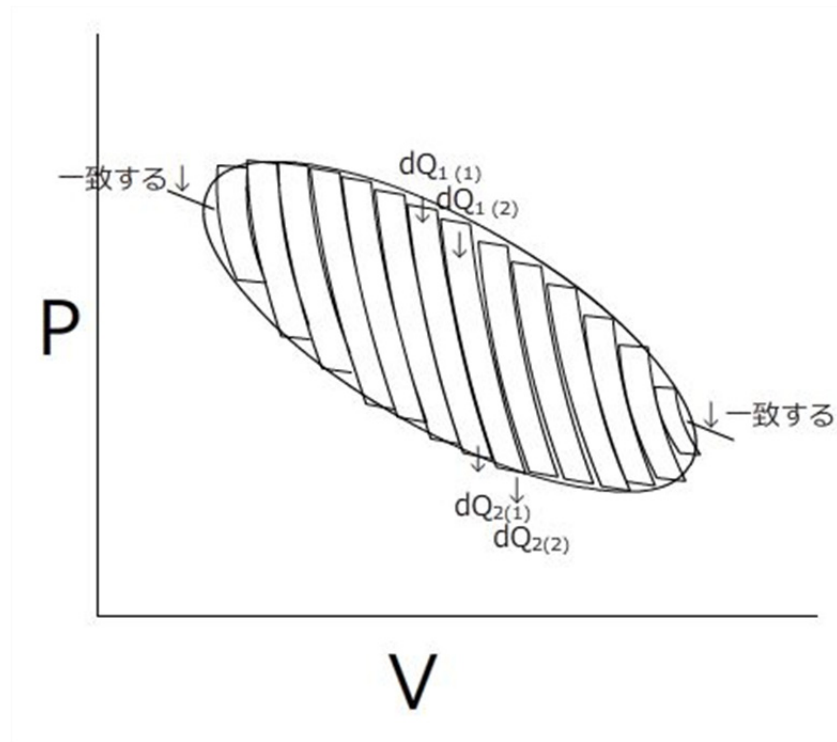


図 2.4 無数のカルノーサイクルの複合サイクル

更に,

$$\left( \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \right) + \left( \frac{Q'_1}{T_1 + \Delta T} - \frac{Q'_2}{T_2 + \Delta T} \right) = 0 \quad (2.3.6)$$

ここで、プラスは熱量が流入する正の向き， マイナスは熱を排出する負の向きであり， この符号を  $Q$  に含ませれば， いくつかのカルノーサイクルを組み合わせると図 2.4 で示したように， 次のように考える事ができる．

$$\frac{dQ_{1(1)}}{T_{1(1)}} + \frac{dQ_{2(1)}}{T_{2(1)}} = 0 \quad \text{カルノーサイクル①}$$

$$\frac{dQ_{1(2)}}{T_{1(2)}} + \frac{dQ_{2(2)}}{T_{2(2)}} = 0 \quad \text{カルノーサイクル②}$$

$$\frac{dQ_{1(3)}}{T_{1(3)}} + \frac{dQ_{2(3)}}{T_{2(3)}} = 0 \quad \text{カルノーサイクル③}$$

$$\therefore \sum \left( \frac{dQ_{1(i)}}{T_{1(i)}} + \frac{dQ_{2(i)}}{T_{2(i)}} \right) = 0 \quad (2.3.7)$$

$$\therefore \sum \left( \frac{dQ_i}{T_i} \right) = 0 \quad (2.3.8)$$

これを周回積分と置き換えると,

$$\oint \frac{dQ_i}{T_i} = 0 \quad (2.3.9)$$

$$\oint \frac{dQ_i}{T_i} = \int_{A(Path1)}^B \frac{dQ}{T} + \int_{B(Path2)}^A \frac{dQ}{T} = 0 \quad (2.3.10)$$

$$\int_{A(Path1)}^B \frac{dQ}{T} = - \int_{B(Path2)}^A \frac{dQ}{T} \quad (2.3.11)$$

$$\int_{A(Path1)}^B \frac{dQ}{T} = \int_{A(Path2)}^B \frac{dQ}{T} \quad (2.3.12)$$

これにより,  $\frac{dQ}{T}$  は, 図 2.5 に示すように, 経路によらず一定である. よってこれは状態量である. そこで, この量を以下のように定義して, この  $S$  がクラウジウスによって, 「エントロピー」と命名された.

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2.3.13)$$

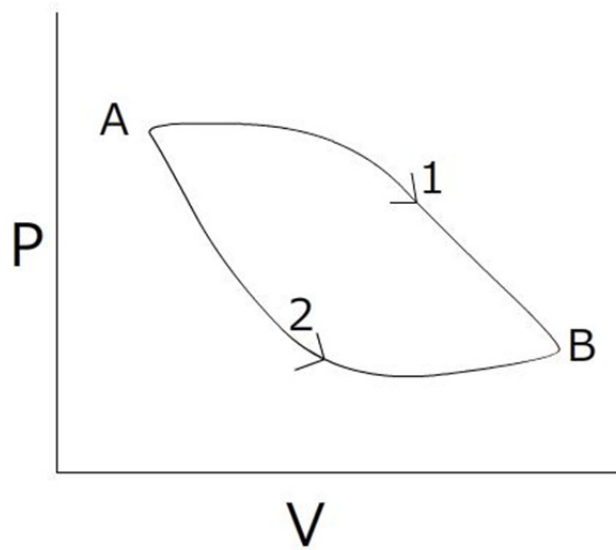


図 2.5 状態量の定義および意味の図示化

### 2. 3. 2 エントロピーと温度および体積の関係

上記クラウジウスの定義式と熱力学の第1法則から以下に示す誘導から、エントロピーは温度と体積の2つの独立変数から成る関数であることがわかる。(ここで、 $T$ : 温度,  $V$ : 体積,  $P$ : 圧力,  $U$ : 内部エネルギーおよび  $Q$ : 熱量,  $n$ : モル数)

$$dQ = Tds \quad (\text{式 2.2.13 より}) \quad (2.3.14)$$

$$dQ = dU + PdV \quad (\text{熱力学第1法則}) \quad (2.3.15)$$

これらを統合すると,

$$Tds = dU + PdV \quad (2.3.16)$$

ここで、 $n$  [mol]の気体について考える。 $C_v$ を定積比熱、 $R$ を一般気体定数とすると,

$$nC_v = \frac{dU}{dT} \quad \therefore dU = nC_v dT \quad (2.3.17)$$



$$PV = nRT \quad \therefore P = \frac{nRT}{V} \quad (2.3.18)$$

式(2.2.17) および式(2.2.18) を式(2.2.16) に代入し,  $dS$ についてまとめると,

$$dS = n \frac{C_v}{T} dT + n \frac{R}{V} dV \quad (2.3.19)$$

積分すると,

$$S_2 - S_1 = nC_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2.3.20)$$

これより,  $n$ ,  $C_v$  と  $R$  は定数なので, エントロピー  $S$  はそれぞれ 温度  $T$  と体積  $V$  を独立変数 とすることが分かる.

### 2. 3. 3 ボルツマンの式

統計熱力学において最も重要な式の1つが次に示すボルツマンのエントロピー式である.

$$S = k \cdot \ln W \quad (2.3.21)$$

ここで,  $k$  はボルツマン定数 (分子一個の気体定数) である. また,  $W$  は, 微視的状态数あるいは熱力学的確率 (真分数ではなく整数値) を意味し, ミクロな視点から分子が置かれた状態の場合の数を意味する. ボルツマンが用いたこの定義式の詳細な誘導は既述の統計力学の解説書等<sup>59)~66)</sup>に詳しく書かれているが, ここでは, エントロピーの概念を客観的に理解するために, ミクロな視点からのボルツマンの定義式とマクロな視点からのクラウジウスの定義式との関係を明らかにする方法を用いて, 以下に誘導する.

まず, クラウジウスの式から導かれる式(2.3.20)において, 以下の関係を用いる. ここで,  $N$  は分子の個数,  $N_A$  はアボガドロ数.

$$\bullet C_v = \frac{3}{2}R$$

$$\bullet n = \frac{N}{N_A}$$

$$\bullet k_B = \frac{R}{N_A}$$

これより,

$$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= nC_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \\ &= \frac{N}{N_A} \frac{3}{2} R \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \frac{N}{N_A} R \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \\ &= k_B \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{3}{2}N} + k_B \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^N \end{aligned} \quad (2.3.22)$$

$$= k_B \ln\left[\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{3}{2}N} \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^N\right] \quad (2.3.23)$$

ここで、エントロピー $S$ は体積 $V$ と温度 $T$ をそれぞれ独立変数にすることに着目して、それぞれ、等温変化での体積とエントロピーの関係、定積変化における温度とエントロピーの関係について次のように考える事で、ボルツマンの定義式における微視的状态量 $\Omega$ とマクロなクラウジウスの式におけるエントロピー $S$ との関係について説明できる。この説明方法は、エントロピー概念のとらえ方として最も簡単で、より客観的な説明方法だと考える。以下では、今後、一般啓蒙書の読者のような基礎知識の無い者に対して説明する場合も想定して、特に平易な解説方法で説明する。

### 2. 3. 3. 1 等温変化場における体積とエントロピーの関係

温度が一定、即ち分子の速度が、比較する2つの状態①および②の間で等しく

体積のみが異なる場合の場合の数  $\Omega$  について考える．この時， $\Omega$  の求め方のアプローチとして次の2通りの考え方が可能である．

(1) 体積変化によって変化する分子の分布の組み合わせから誘導する方法

式(2.3.23)において，等温変化，即ち温度一定の状態での体積変化を考えると， $T_2 / T_1 = 1$ ，なので，

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^N \quad (2.3.24)$$

ここで， $V$  を単位体積を1とした時の何倍の広さ，という概念で考えて，その中に  $N$  個の分子が散らばっている場合の数  $\Omega$  を以下のように考える．

図 2.6 に示すように，例えば， $N$  個の分子が，体積  $V$  がそれぞれ1倍，2倍および3倍に存在する場合の数  $\Omega$  を求めてみると，まず，最小単位体積1で分子数3の時は1通りしかないので場合の数  $\Omega_1 = 1$ ，よって， $S_1 = S_1 - S_1 = k_B \ln(1) = 0$  となり，図 2.6 の状態①．

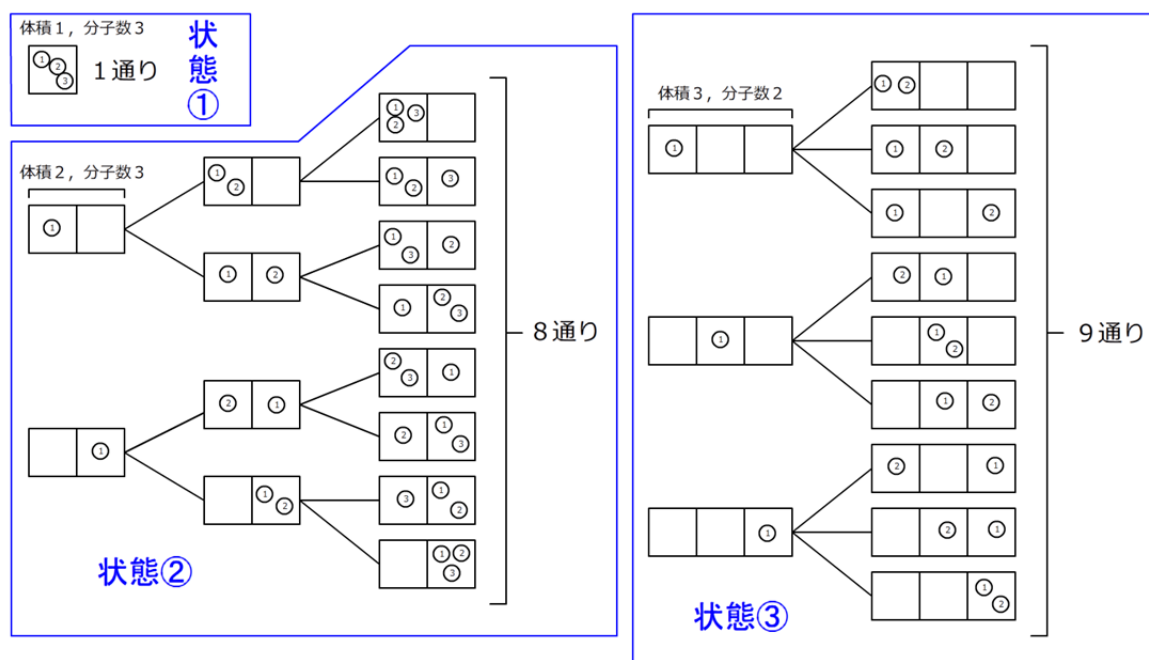


図 2.6 分子の分布の組み合わせによる  $\Omega$  の求め方

体積 2 で分子数が 3 の場合は、 $V_1=1$ ,  $V_2=2$  および  $N=3$  なので、式 (2.3.24) に代入すると、

$$W_2 = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^N = 2^3 = 8 \quad \text{通り}$$

となり、図 2.6 の状態②と同じ結果となる。

体積 3 で分子数が 2 の場合は、 $V_1=1$ ,  $V_2=3$  および  $N=2$  なので、式 (2.3.24) に代入すると、

$$W_3 = \left( \frac{V_3}{V_1} \right)^N = 3^2 = 9 \quad \text{通り}$$

となり、図 2.6 の状態③と同じ結果となる。

ここで、状態②と状態③の差分について考えてみると、

$$S_3 - S_2 = k_B \ln \left( \frac{V_3}{V_2} \right)^N = k_B \ln \left( \frac{W_3}{W_2} \right) \quad (2.3.25)$$

更に、ここで、 $W_2=1$  と変更して、状態②を基準エントロピーに設定し直すと、 $S_2=0$  となるので、

$$S_3 = k \cdot \ln W_3 \quad (2.3.26)$$

となり、この形、即ち、式 (2.3.21)  $S = k_B \ln W$  の式がクラウジウスの式からも導き出されたことになる。これによって、クラウジウスの式 (2.3.23) における体積変化は、ボルツマンの式 (2.3.21) と関係づけられたことになる。

**(2) 体積中に配置される分子の分布が非平衡状態時のように、一様でない場合の場合の数を計算することによる誘導方法**

ある瞬間の分子の分布を考えると、 $W$  を以下の式を使って、図 2.7 に例示した考え方によって求める。

$$W = \frac{(N_1 + N_2)!}{N_1! N_2!} \quad (2.3.27)$$

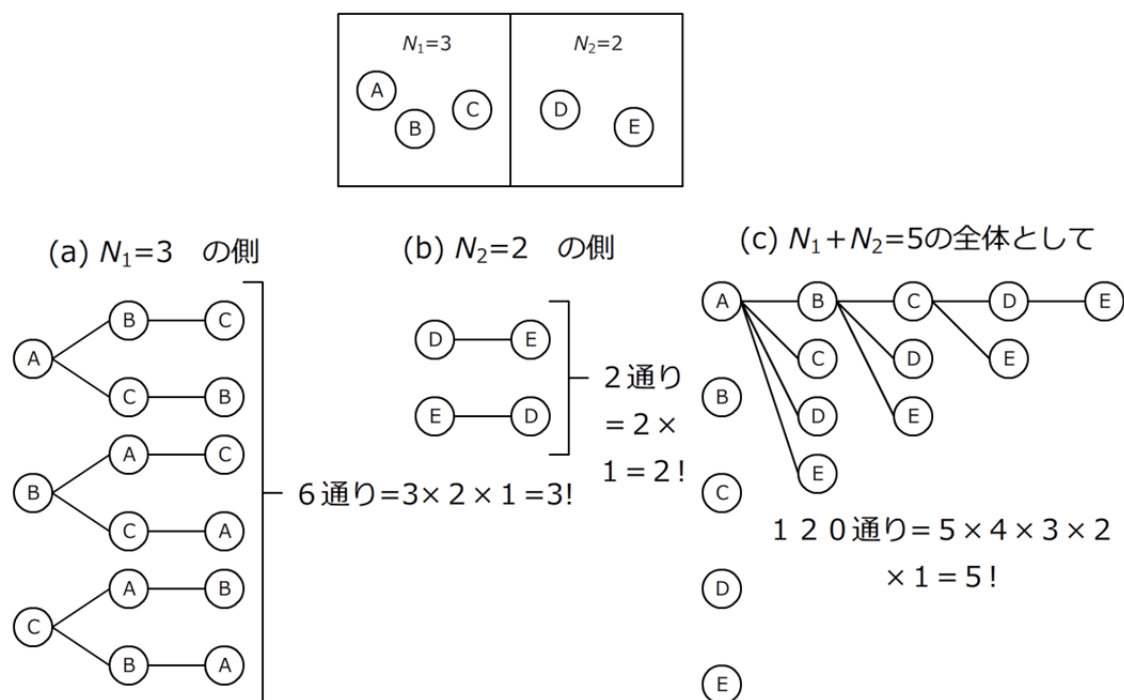
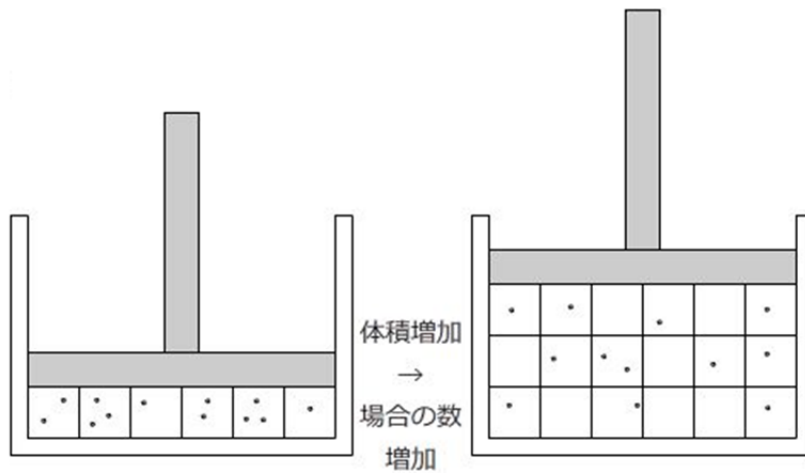
図 2.7 分子の分布の非平衡状態の場合の数による  $W$  の求め方

図 2.7 は、体積  $V=2$  の中に、分子が 5 個存在していて、ある瞬間を切り取ったときに、左側の領域に 3 個、右側の領域に 2 個存在していた場合、場合の数は式 (2.3.27) より以下のように求まる。

$$W = \frac{(3+2)!}{3! \times 2!} = \frac{5!}{3! \times 2!} = \frac{120}{6 \times 2} = 10 \text{ 通り}$$

上記が示す意味は、例えば分子に A~E までの名前を付けて、その順番まで気にして場合分けすると、120 通りがある。この内、左側に 3 個、右側に 2 個となる場合がどれほど存在するかを求めたことに等しい。ここで、 $W$  の逆数  $1/W$  を考えると、 $12 / 120 = 0.1$  となり、左に 3 個、右に 2 個となる場合の確率を求めたことになる。

図 2.8 体積  $V$  と場合の数  $W$  の関係

これを一般化すると,

$$W = \frac{\left( \sum_{i=1}^V N_i \right)!}{\prod_{i=1}^V N_i!} \quad (2.3.28)$$

よって, 式(2.3.21)より,

$$S = k_B \ln \left[ \frac{\left( \sum_{i=1}^V N_i \right)!}{\prod_{i=1}^V N_i!} \right] \quad (2.3.29)$$

となり, これによっても, 体積  $V$  とエントロピー  $S$  の関係を導き出せる.

(1)の誘導方法も(2)の誘導方法も共に図 2.8 に示したように, 体積が増加すると場合の数も増加するためエントロピーが増加することを示して, クラウジウスの式とボルツマンの式の共通性を説明できる. しかし, そもそも求め方が異なるので, 微視的状态数(場合の数)  $W$  の計算値は同じにはならない. 一方で, (1)と(2)の方法において, 実際の気体を想定して, 分子数が数えられないほど非常に多く存在していて, 体積も十分に大きく, 更に, 十分に攪拌されて, 図 2.8 の各格

子に入っている分子数が全て等しい仮定して計算すれば、最終的に導かれる  $S$  は (1)の方法でも (2)の方法もほぼ等しい値になるが、莫大な数となるため、実際に計算機などで計算することは不可能である。

### 2. 3. 3. 2 等積変化場における温度とエントロピーの関係

前目 2.3.3.1 においては、等温場において、式(2.3.22)における第 2 項の体積、即ち分子のばらまき方、あるいは位置情報を用いてエントロピーを計算できることを示して、クラウジウスの式とマクスウェルの式の共通性を説明した。一方で、エントロピーは式(2.3.22)における第 1 項に与えられた温度によっても計ることができる。ここでは、体積は等しく、温度、即ち分子の速度が、比較する 2 つの状態①および②の間で異なる場合の場合の数  $W$  について考える。この時、 $W$  の求め方のアプローチとして次の 2 通りの考え方が可能である。

#### (1) 温度変化を体積変化に置き換えて誘導する方法

式(2.3.23)において、体積は等しいので、 $V_2 / V_1 = 1$  となるため、

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}N} \quad (2.3.30)$$

となる。ここで、分子運動論において、分子の平均速度  $v$  と温度  $T$  の関係は以下の式より、

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T \quad (2.3.31)$$

よって、

$$T = \frac{1}{3} \frac{m}{k_B} v^2 \quad (2.3.32)$$

これより、

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{m/(3 \cdot k_B)}{m/(3 \cdot k_B)} \cdot \frac{v_2^2}{v_1^2} \right)^{\frac{3}{2}N} = k_B \ln \left( \frac{v_2^2}{v_1^2} \right)^{\frac{3}{2}N} = k_B \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{3N} \quad (2.3.33)$$

$v = L(\text{距離}) / t(\text{時間})$  とすれば,

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{L_2/t}{L_1/t} \right)^{3N} = k_B \ln \left( \frac{L_2^3}{L_1^3} \right)^N = k_B \ln \left( \frac{V_{t2}}{V_{t1}} \right)^N \quad (2.3.34)$$

となり, ここで,  $V_t$  は 単位時間あたりに分子が移動できる体積 という概念が導かれる.

式(2.3.22)より,

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{V_{t2}}{V_{t1}} \right)^N + k_B \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^N = k_B \ln \left( \frac{V_{t2}}{V_{t1}} \cdot \frac{V_2}{V_1} \right)^N \quad (2.3.35)$$

$V_t$  の概念は少し分かりにくい, 温度  $T$  の変化を体積  $V_t$  の変化に置き換えてしまうことで, 体積変化について前目 2.3.3.1 で誘導した方法用いれば, 温度変化においても, マクロな視点からのクラウジウスの式と, ミクロな視点によるボルツマンの式の間を結びつけることができたことになる.

## (2) 温度が上昇するとマクスウェルの速度分布における速度のバリエーションが増加することから説明する方法

温度は, 分子 1 個当たりの運動エネルギーに相当する. 分子の運動エネルギーは分子の速度によって決まる. 前節では, 分子の平均速度を用いて考えた. しかし, 実際の分子は様々な速度を持った分子の混合物であり, そのバリエーションは温度によって変化する. このバリエーションをエントロピーと結びつけて考える事も可能であり, これが統計熱力学における温度とエントロピーの関係を結びつける概念である.



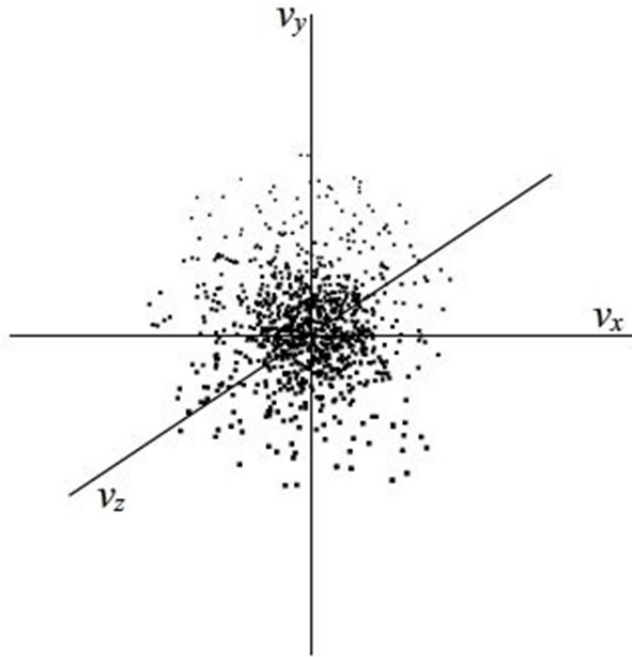


図 2.9 分子の速度分布座標

実際の気体中の分子は、様々な方向へ向かって移動している．図 2.9 に示したように，速度を  $x, y$  および  $z$  の 3 次元のベクトル成分に分けて考えると， $x=0, y=0$  および  $z=0$  となる座標中心が最も数が多くなる確率が高い．一方で，外側に速度が速くなるにしたがって存在する数は少なくなると考えられる．

ボルツマン原理と呼ばれる，ボルツマンによって発見された，以下のようなエネルギー密度関数  $P(E)$  と状態密度  $\rho(E)$  の関係がある．

$$P(E) \propto \rho(E) e^{-E/k_B T} \quad (2.3.36)$$

この関係を分子速度  $v$  に置き換えると，

$$P(v) = \frac{1}{Z} e^{-mv^2/2k_B T} \quad (2.3.37)$$

ここで， $Z$  は正規化係数（場合の数）であり， $-\infty$  から  $+\infty$  までを以下のように積分して  $Z$  を求めて，これを分母にすれば確率（確率密度関数）が求まる．

$$Z = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-mv^2/2k_B T} dv_x dv_y dv_z \quad (2.3.38)$$

この積分を以下のようなガウス積分の公式から求める.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2} dx = \left( \frac{\pi}{a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.39)$$

ここで,  $a = m/2k_B T$  と置けば, ( $m$ :質量)

$$Z = \left( \frac{\pi}{m/2k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.3.40)$$

式(2.3.37)より,

$$p(v) = \frac{1}{Z} e^{-mv^2/2k_B T} = \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-mv^2/2k_B T} \quad (2.3.41)$$

となり, これをマクスウェルの速度分布といい,  $P(v_x)$  について描くと, 図 2.10 に示したような曲線となる.

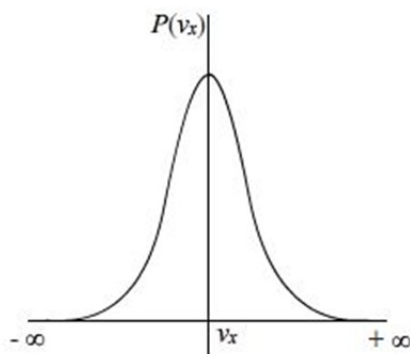


図 2.10 マクスウェルの速度分布

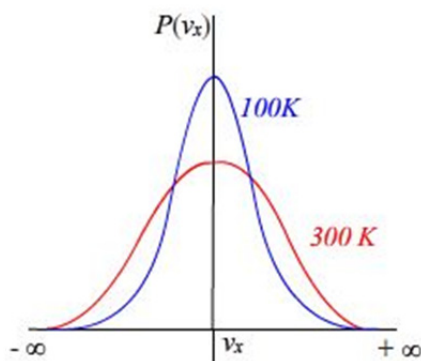


図 2.11 マクスウェルの速度分布の比較

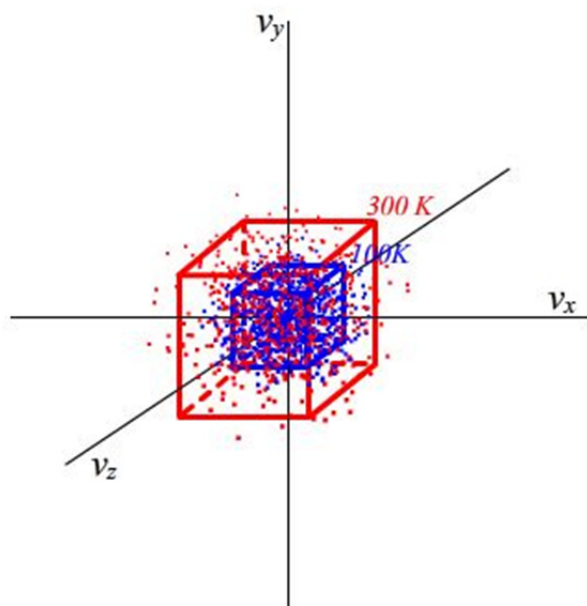


図 2.12 分子の速度（ベクトル）分布の比較

この分布を温度をパラメータとして比較してみると、例えば  $T=100\text{ K}$  と  $T=300\text{ K}$  について分布を求めると図 2.11 のようになる。温度の高い  $300\text{ K}$  の方が裾野が広がっているが、これは、分子速度のバリエーションが多くなったことを意味する。図 2.12 に示すように、 $100\text{ K}$  の場合は分布がより中心に集まっており、 $300\text{ K}$  では分布が広範囲に広がっている。このことは、図中に立方体で示したように、速度分布座標において分布範囲の体積が増加したと考える事もできる（但し、温度の高低に関係なく分布自体は無限に広がるため、立方体の中だけに分布するのではなく、立方体の枠の外にも分布する）。体積が広がることは、前目 2.3.3.1

で議論したように、場合の数の増加を意味するため、エントロピーが増加すると考える事ができる。即ち、温度が上昇するとエントロピーが増加することになるので、マクロな視点のクラウジウスの式から導かれる式(2.3.30)と矛盾しない。

#### 2. 3. 4 強度依存エントロピーと容量依存エントロピー

前項までで議論してきたように、クラウジウスの式では、式(2.3.20)のように、エントロピー $S$ は体積 $V$ の変化と、温度 $T$ による変化に独立に依存する。熱力学の分野では、温度や圧力のように物質の量に依存せずにその強弱に依存する状態量を「示強性状態量（強度性状態量）」と呼び、体積や内部エネルギーのように物性の強弱ではなく物質の量に依存する状態量を「示量性状態量（容量性状態量）」と呼ぶ。そこで、本論文では、エントロピーの変化量について、温度変化に依存するエントロピー変化を「強度依存エントロピー」、体積変化に依存するエントロピー変化を「容量依存エントロピー」と呼ぶこととする。しかし、一方で、エントロピーは本来は、1つの状態量であるので、熱力学における、温度と体積の2つの独立変数の変化を連続的に解釈あるいは認知できるかどうか、エントロピーの「本質的な意味」を理解する上で非常に重要だと考える。この観点から、前項2.3.3の内容を以下に検討する。

前目2.3.3.2の(2)においては、温度の変化に伴うエントロピー（強度依存エントロピー）変化について、マクスウェルの速度分布が、温度が高くなると速度座標上の体積が増加するためバリエーション即ち場合の数が増加してエントロピーが増加することを説明した。しかし、一般的に考えると、思考の過程においては、実際の実体積の増加と、速度座標上の体積の増加は同じものとは認知しづらいので容量依存エントロピーと強度依存エントロピーが同じものであると解釈することは難しいと考える。

一方、前目2.3.3.2の(1)の解釈の仕方は、式(2.3.35)のように、体積 $V$ の項と温度を体積に置き換えた $V_t$ の項を式の上で並べて考えられるので、比較的容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを区別せずに理解し易いと考える。しかし、ここでの体積 $V_t$ は、単位時間あたりに分子が移動する体積という意味になるので分かりづらい。そこで、途中の式の式(2.3.34)において、分子速度 $v_1, v_2$ を、それぞれ、単位時間 $t$ に移動する距離 $L_{t1}, L_{t2}$ に置き換えたが、そのまま式(2.3.35)の第1項に残して、第2項の体積 $V$ を距離 $L$ の3乗とすれば式(2.3.35)は、以下のように距離だけで比較できる式に変形できる。

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{V_{t2}}{V_{t1}} \right)^N + k_B \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^N = k_B \ln \left( \frac{L_{t2}^3}{L_{t1}^3} \right)^N + k_B \ln \left( \frac{L_2^3}{L_1^3} \right)^N = k_B \ln \left( \frac{L_{t2}}{L_{t1}} \cdot \frac{L_2}{L_1} \right)^{3N} \quad (2.3.42)$$

この式においては、温度が高くなれば、単位時間に移動する距離が長くなり、体積が大きくなれば移動できる距離が長くなると説明できるので、移動距離のみで比較できるため、温度と体積の区別無く、強度依存エントロピーと容量依存エントロピーを連続的な1つのエントロピーとして理解し易いと考える。また、後の議論で検討する言語表現において、本研究で強度依存エントロピーと容量依存エントロピーを区別することなく表現するのに適していると考え、「捕まえにくさ」であれば、分子の「単位時間に移動する距離： $L_t$ 」が増えても「移動できる距離： $L$ 」が増えても共に「捕まえにくさ」が増すと理解することができると考えられるので、この式(2.3.42)を使った説明方法は、エントロピーの「本質的な意味」の説明に比較的に適している可能性がある。

### 2. 3. 5 情報量の式

序論でも述べたように、エントロピーという概念は情報理論でも用いられる<sup>53) ~ 55), 67), 68)</sup>。この理論はクロード・シャノン（1916～2001年）により、1948年に展開された。情報源が多様な情報を発信するとき、 $i$  番目のシンボル（記号や文字）が出現する個々の生起確率を  $p_i$  とすると、そのシンボルの持つ情報量  $I_i$  を以下で定義する。

$$I_i = \log_2 \left( \frac{1}{p_i} \right) = -\log_2 p_i \quad (2.3.43)$$

ここで、対数の底としては2を用い、1ビットとする。

1つの情報源が持つ情報の総数が多ければ多いほど、その情報源は豊富な情報量を持つことになるが、情報源の多様性を示す尺度として、情報源の出す情報量の平均を情報エントロピー（平均情報量） $S$ と定義して、以下で算出される。

$$S = \sum p_i \cdot \log_2 \left( \frac{1}{p_i} \right) = - \sum p_i \cdot \log_2 p_i \quad (2.3.44)$$

ここで  $p_i$  には,  $\sum p_i = 1$  の条件がある. すべての情報を伝達するシンボルが等しい生起確率を持っていたとすると,  $p = 1/M$  が成り立つので (ここで  $M$  : シンボルの総数),

$$S = M \left( \frac{1}{M} \right) \log_2 (M) = \log_2 M \quad (2.3.45)$$

となる. ここで  $M$  を場合の数  $W$  と置き換えれば, 式(2.3.21)に示したボルツマンのエントロピー式と, 対数の底が異なるだけの同様な形となる. 一方で, この式より求められるエントロピーはシンボルの生起確率を使って求めるため, シンボルを何にするのか, その大きさをどの程度にするのか, によって, エントロピー計算のアルゴリズムが異なり, エントロピーの計算値自体も様々な値をとり得る.

## 2. 4 第2章のまとめ

本章では, 熱力学的エントロピーの理論を中心に, 情報のエントロピーに至るまで, エントロピーの基本的な定義と概念についてまとめた. エントロピーは, クラウジウスによるマクロ的な視点から定義したものとボルツマンのミクロ的な視点から定義したものの2つの数式がある. また, クラウジウスの式より, エントロピーは温度などの示強性状態量を独立変数とする強度依存エントロピーと, 体積などの示量性状態量を独立変数とする容量依存エントロピーに分けて論ずることもできる.

クラウジウスによるマクロな視点からの定義式と, ボルツマンのミクロな視点からの定義式が論理的に同一である事を誘導する方法としては, 体積を変数とする容量依存エントロピーについては, 単位体積を考えて, 各単位体積にいくつの分子が存在するかといった分子の分布について場合の数を考える事で説明がし易い. 一方で, 温度を変数とする強度依存エントロピーについては, まず分子の速

度座標系を考えて、その中で単位体積を基準とした速度分布から場合の数を考えるため、実際の体積と、速度座標系での体積を連続的な物としては考えにくいので、理解しづらいところがある。しかし、体積を更に次元を小さくして、距離のディメンジョンまで分解して考えると理解し易くなる。即ち、温度が高くなれば、単位時間に移動する距離が長くなり、体積が大きくなれば移動できる距離が長くなると説明できるので、移動距離のみで比較できる。そのため、温度と体積の区別無く、強度依存エントロピーと容量依存エントロピーを連続的な1つのエントロピーとして理解し易い。

次に、情報エントロピーについて、その定義式を示して、平均情報量について説明した。すべての情報を伝達するシンボルが等しい生起確率を持っていた場合を考えると、平均情報量の式はボルツマンのエントロピー定義式と同様な式となる事を示して、これらの間の共通性について述べた。

このように、本章では、本来は同じ1つのエントロピーという概念であるものに対して、いくつかの定義式が存在していることを示して、その共通性について論じた。しかし、それらの理論を端的に一言で「同一のものである」、と言うことは難しい。もし、これらの共通性について、あえて一言でまとめるとすれば、エントロピーは状態量であるということである。これは、クラウジウスの式による論理的な証明によっても明らかであるが、ボルツマンの式における場合の数はその状態を示していると考え事ができるし、また、情報のエントロピーについても、シンボルのバリエーションというものは、正に状態を示していると言うことができる。したがって、もし、エントロピーの状態を直接見せて比較することができれば、これらの異なった定義の根底に潜む、エントロピーの「本質的な意味」を感じることができるのではないかと考える。

このように、これまでエントロピーは、状態量でありながら、人間の感覚によって感じる事ができるかどうかは不明であった。しかし、もし、何らかの方法で、エントロピーを感じる事が可能になれば、これまで、理解が難しかったエントロピーも、温度、体積および圧力のように、当たり前の概念として、理解することが可能になるのではないかと考える。

## 第3章

# エントロピー概念の 言語表現



### 3. 1 はじめに

第2章で論じたように、数式による論理的な表現は、エントロピーの概念を理解する上で最も重要なものであると考える。しかし、エントロピーは状態量であり、その状態を直接表現することができるのではないかと考える。エントロピーと同じ状態量である温度は、熱い物を触れば熱く感じ、冷たい物を触れば冷たく感じる。エントロピーの場合は、後述するように、分子の運動を再現するアニメーションを見せるなど、視覚表現によってその感じを伝えられるのではないかと考えるが、それを補足する言語表現も非常に重要であると考えられる。温度の場合も、触れた指などが感じる感覚を「熱い」や「冷たい」という言語表現で伝えることができないと、その概念を思考の中に定着させることは難しいであろう。

学習科学の分野では、人間の知能の発達において、視覚情報の相互関係を認識したり、各要素を1つにまとめていく能力と文字や数字などの言語情報を頭の中で処理する能力が重要である事が明らかにされている<sup>69)</sup>。また、教育の分野では、美術教育や感性教育において、「グニャグニャ」や「モコモコ」等の言語表現とその言語表現に対応するロープや羊の毛などの視覚表現、即ち「視覚言語」を組み合わせることで理解させることの重要性が示されている<sup>70)</sup>。

このように、エントロピーの場合においても、視覚からの情報に加えて、言語表現を使うことはその概念を理解する上で非常に有効だと考える。本章では、これまで啓蒙書や教科書などで用いられてきたエントロピーの変化を表現する言語表現にはどのようなものがあるかの調査と、それらの言語表現が持つ問題点について議論する。

### 3. 2 教科書や啓蒙書に記されたエントロピーの言語表現

熱力学や情報理論の教科書やエントロピーについて解説する教養書や啓蒙書等では第2章で述べた数式と共に、様々な言語による表現によってエントロピーの概念が説明されている。書物<sup>60)~66),71)~94)</sup>やインターネットのホームページ上でエントロピーの説明に用いられる言語表現を任意に選び出し表3.1に示した。

### 3. 3 エントロピーの言語表現の問題点と仮説

前述のように、エントロピーの概念を理解する上で、言語による表現は簡単に表記できるため用いやすく、数式を論理的に説明する文章の中に「乱雑さ」等の感覚的な言語表現を組み合わせることで理解が深まることが期待される。しかし、

表 3.1 エントロピーの概念を示す言語表現

無秩序	激しさ
乱雑さ	価値の低さ
雑多さ	わからなさ
複雑さ	コントラストのなさ
曖昧さ	ぼやけた感じの強さ
でたらめ度	自然さ
拡散の度合い	認識できる度合い
均一さ	分散の度合い
均衡度	平衡度
安定の度合い	多様性の高さ

表 3.2 エントロピーの概念を示す言語表現のカテゴリー

表現分野	容量性変化に伴うエントロピー変化(容量依存)	強度性変化に伴うエントロピー変化(強度依存)
マクロな熱力学的状態を表現している	安定の度合い, 均一さ, 平衡度, 均衡度, 広がり の度合, 拡散の度合い	激しさ, 無秩序さ, 乱雑 さ
ミクロな統計力学的状態を表現している	拡散の度合い, 分散の度 合い, 捕まえにくさ, 曖 昧さ, ぼやけた感じの度 合い	無秩序さ, 乱雑さ, 捕ま えにくさ
情報量の大きさについて表現している	ぼやけた感じの度合い, 認識できる度合い, コン トラストのなさ, 曖昧 さ, わからなさ, 拡散の 度合い, 捕えどころのな さ(捕まえにくさ)	雑多さ, 複雑さ, 多様性 の高さ, でたらめ度, 無 秩序さ, 乱雑さ
価値について表現している	価値の低さ, 貴重でない 度合い	

感覚的な言語は読者の主観に訴えるため、個人差があり、場合によっては全く異なったイメージを与えてしまうことも考えられる。表 3.1 に示した言語表現群も、見方によっては全く異なったイメージを持たせる可能性のある表現が混在している。表 3.2 に表 3.1 の言語表現を著者の主観によってカテゴリー化したものを示した。分野として、「マクロな熱力学的状態」「ミクロな統計力学的状態」「情報量の大きさ」「価値」についての 4 つと、それぞれの分野に対して「容量

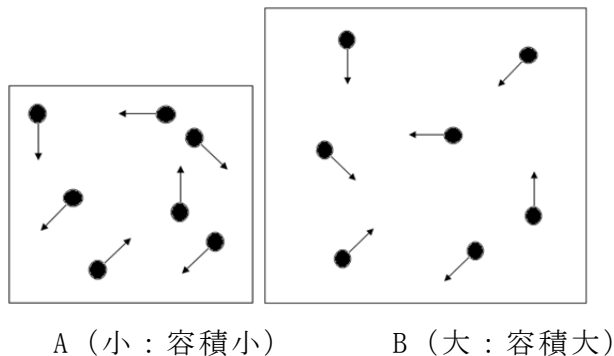


図 3. 1 容量依存エントロピー

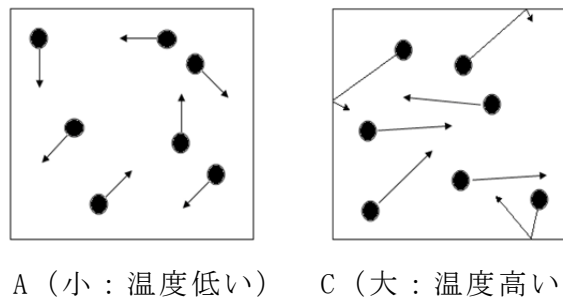


図 3. 2 強度依存エントロピー

依存エントロピー」と「強度依存エントロピー」に分けた．基本的には全ての表現がエントロピーの高い方向性を表現したものである．もしこれらが，エントロピーの本質的な意味を表現できているのであれば，いずれの表現も他のカテゴリーにおいて適用可能なはずである．しかし，表現によっては他のカテゴリーでは全く的を射ない表現になってしまう場合がある．特に容量依存エントロピーと強度依存エントロピーの場合は互換性が小さいのではないかと考える．

このことの考察のために，図 3.1 と図 3.2 にそれぞれ容量依存エントロピーと強度依存エントロピーの概念を視覚化したものを示し，言語表現とエントロピーの関係について主観的検討を行った（ここで矢印は速度ベクトルを示す）．

例えば，被験者に図 3.1 に示した，温度が等しくて（即ち分子の速度は等しい），容積だけが異なる容量依存エントロピーの大小について，「無秩序さ」「複雑さ」や「乱雑さ」の高い方を選ばせた場合，必ずしもエントロピーの大きい図 3.1-B を選ぶとは限らないと考える．本来の意味では，容積が増えるということは，そ

れだけ分子が存在し得る範囲が増加し、選択可能な微視的状态数が増えることになりエントロピーは増加する。しかし、図 3.1-A と図 3.1-B を比較するとき、分子が狭い領域に固まっている図 3.1-A のほうが強度的に強く感じられ、熱的強度を示す「複雑さ」、「乱雑さ」あるいは「無秩序さ」が高いと感じ図 3.1-A を選ぶ確率が高くなると予想する。

また、図 3.2 で示した、容積は等しくて、温度が異なる（即ち分子の速度が異なる）強度依存エントロピーについて、「安定の度合い」、「曖昧さの度合い」あるいは「拡散の度合い」の大きい方を読者に選ばせた場合、本来の意味とは逆の、エントロピーの小さい図 3.2-A の方を選ぶ確率が高いと予想される。なぜならば、「安定なもの」や「曖昧なもの」という表現は、強度的には弱さを含んでいるように感じられるからである。したがって、温度が高く、分子の運動が激しく強度的に強いイメージのあるエントロピーの高い図 3.2-C は選びにくいのではないかと考える。

このように、強度依存エントロピーの変化に対して容量依存エントロピー変化を表現するのに適した言語表現を用いたり、容量依存エントロピーの変化に対して強度依存エントロピー変化を表現するのに適した言語表現を用いたりすると混乱を招くおそれがある。したがって、エントロピーの概念を言語表現と視覚表現を用いて説明しようとするとき、比較させようとする対象が容量依存エントロピーであるか強度依存エントロピーであるかを明確にした上で、それぞれ、容量依存エントロピーには容量依存エントロピー表現に適した言語表現で、また、強度依存エントロピーには強度依存エントロピー表現に適した言語表現で説明する必要があると考える。

### 3. 4 容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを区別することなしにエントロピーを表現する的確な言語表現についての検討

これまでの議論では、あえて容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを分けて考え、この 2 つを独立のものとして別々の表現手法によって表現することを考えてきた。しかし、エントロピーの値は本来一元的なものである。一般の現象においては、この 2 種類の変化が同時に起こる場合がほとんどであり、その過程における状態を 1 つのエントロピー値で表すことができる。したがって、エントロピーの概念を本質的に表現しようとした場合、このような容量依存エントロピーと強度依存エントロピーが同時に変化するような変化に対しても、矛盾なく

表現できる手法が必要である．そこで，容量依存エントロピーや強度依存エントロピーを区別することなく直感的に表現できる言語表現について検討を行う．

前節で示した言語表現について，「乱雑さ」や「無秩序さ」という表現はエントロピーの概念を代表する言葉として教科書や啓蒙書などに最も多く用いられる表現である．しかし，これらの言葉は，議論したように，感覚的に強度依存エントロピーに適した言語表現であると考えられるので，容量依存エントロピーを正確に表現するのには適していない可能性も考えられる．また，「均衡度」，「平衡度」あるいは「拡散の度合い」といった表現もエントロピーの容量依存エントロピーの側面を表現できるが，強度依存エントロピーの増減を的確に表現できているとは限らないと考える．しかし，これらの考察はあくまでも主観的なものであるので，次章で示す実験を行うことで，これらの中から容量依存エントロピーおよび強度依存エントロピーの両方を1つの言葉で表現できる的確な言語表現の特定を試みる．

一方で，これまでエントロピー概念の表現としては一般的でなかった表現の中に適当な表現が見つかる可能性もある．その1つとして，ここでは「捕まえにくさ」という表現について考える．著者らの調べた範囲では，「捕まえにくさ」をエントロピー概念の言語表現に用いていた文献は1つ存在したが<sup>88)</sup>，この表現はこれまで一般的に用いられてきた表現であるとはいえない．しかし，この表現であると，容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを区別することなく表現できる可能性があると考えられる．即ち，容量依存エントロピーについて考えた場合，図3.1のように容積が広がって分子が広い範囲に散ってしまえば直感的に任意の1つの分子を捕まえることは難しくなると考えることができる．したがって，容量依存エントロピーの高さは「捕まえにくさ」と正の相関がある可能性がある．また，強度依存エントロピーについて考えた場合，図3.2のように分子の移動速度が上昇すると（温度が上昇），早く動いている分子ほど捕まえにくいと考えることができると推測する．したがって，強度依存エントロピーについても「捕まえにくさ」との間に正の相関が期待できる．これらのことは，第2章で論じた式(2.3.42)においても，分子の「単位時間に移動する距離： $L_t$ 」が増えても「移動できる距離： $L$ 」が増えても共に「捕まえにくさ」が増すと理解することができる．

また，「捕まえにくさ」というのを「捕らえどころのなさ」と読み替えると，デジタル画像等の情報エントロピー<sup>9)</sup>の表現に用いられる「ぼやけた感じ」「コントラストのなさ」や「曖昧さ」といったニュアンスも内包することができると考

える。以上のことから、エントロピーの概念を学ばせる際に、容量依存エントロピーおよび強度依存エントロピーを区別することなしにエントロピーの大小を説明する表現の1つの候補として、「捕まえにくさ」は学習者にエントロピーの本質を理解させる上で有効な言語表現となり得る可能性があると考ええる。

### 3. 5 第3章のまとめ

本章では、エントロピーの本質的意味の理解において、その言語表現の重要性について述べた。また、著者の主観的考察によって、次のような仮説を立てた。即ち、容量依存エントロピーの比較において、「無秩序さ」「複雑さ」や「乱雑さ」等の強度依存エントロピーの表現に適していると考えられる言語表現でエントロピーの高い方を選ばせた場合、必ずしもエントロピーの高い方を選ぶとは限らない。また、強度依存エントロピーの比較において、「安定なもの」や「曖昧なもの」等の容量依存エントロピーの表現に適していると考えられる表現を使ってエントロピーの高い方を選ばせた場合、必ずしもエントロピーの高い方を選ぶとは限らない。更に、容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを区別することなしにエントロピーを表現する的確な言語表現についての検討した結果、「捕まえにくさ」はエントロピーの本質を理解させる上で有効な言語表現となる可能性を論じた。

## 第4章

# 分子運動動画のエントロピー値と 言語表現による感性量との 相関分析

#### 4. 1 はじめに

第2章および第3章でも述べたように、エントロピーの本質的な意味を理解するためには、数式による論理的な説明と共に、視覚表現や言語表現などの表現を使って人間の感覚に情報を与えることが重要であると考え、エントロピーと同じ状態量である温度や圧力が、それぞれ皮膚から感じる「熱い」や「冷たい」、や空気入れの反発力から腕が感じる「強い」や「弱い」に相当するものとして、エントロピーに関しては、分子運動をCGアニメーションで再現して、その動きを見せながら、「乱雑さ」や「ぼやけた感じ」のような言語表現から得る感性を使って示すことを考えた。本章では、この手法を用いて、第3章で立てた仮説を検証するための心理実験を行った。そして、実際の分子運動を表現した領域内を動き回る粒子のCGアニメーションを作成し、運動範囲（面積）や速度（温度）の異なる8種類の映像を被験者に見せ、それぞれ体積や粒子の速度から計算によって得られるエントロピー値と代表的な数種類の言語表現によって与えられる映像に対する感性量との相関性について検討した。

#### 4. 2 エントロピー値と言語表現による感性量との相関関係を調べる実験

##### 4. 2. 1 実験の概要

実験に際し、実際の分子運動を表現するために、単純な円形をした分子モデルを用い、そのスピード（内部エネルギー：温度）と面積（容積）が段階的に異なる8種類のCGアニメーションを作成した。本アニメーションには、インターネット環境等におけるPCのアニメーションとして標準化しているFlashアニメーションを採用し、製作にはAdobe社製FlashMXを用いた。

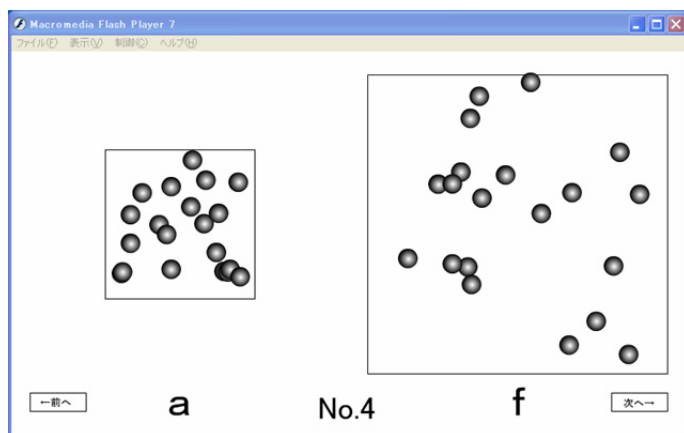


図 4.1 一対比較実験用CGアニメーションコンテンツの例



実験では、これらのアニメーションを被験者に見せて、上述で議論してきた特定の言語表現の内いくつかについて、それらの言語表現によってそれぞれのアニメーションがどのように序列化されるかを一対比較法で検討した。

本アニメーションの例を図 4.1 に示す。本アニメーションでは、各分子はランダムな位置に発生し、発生個数は常に同数である。発生した分子の方向と速度は、水平方向と垂直方向のベクトル成分について、それぞれ右方向か左方向、上方向か下方向のどちらに進むか同じ確率でランダムに決まり、速度は統一で、等速直線運動を続ける。分子が壁にぶつくと完全弾性衝突をして、各ベクトル成分について反対方向に同じ速度で跳ね返る。

実際の分子運動では、2.3.3.2(2)で論じたように、止まっている分子から高速で飛び回る分子までマクスウェルの速度分布に従って、様々な速度を持つ分子が混在している。しかし、本アニメーションで使用したアニメーション作成ソフト（Adobe 社製 Flash-MX）にその作成機能がないため、全ての分子を同じ速度で動作させた。実際の分子ではこうした分子のスピードのバリエーションもエントロピーの概念を表す一つの要素でもあるため、今回のアニメーションがエントロピーの状態を完全に表現しているかどうかは今後検討する余地がある。しかし、一方で熱力学的エントロピー値としては、前述のクラウジウスの式(2.3.20)および式(2.3.33)による算出値として分子の平均速度から正確に求まるため、逆に分子の動きを単純化あるいは抽象化したモデルとして考えることも可能であり、感性量とエントロピーの概念を比較する上では大きな問題はないと考える。また、実際の分子運動では、分子同士の衝突も発生するが、上述と同様に、アニメーション作成ソフトによる作成機能の制限のため、本アニメーションでは再現していない。しかし、一般的に理想気体を想定した希薄な気体では衝突は無視できるものとして扱うことができるので、これについても、概念的には大きな問題はないと考える。

表 4.1 各アニメーションパターンの変数値

	アニメーションパターン							
	a	b	c	d	e	f	g	h
粒子(分子)速度 $v$	1	1	1	2	2	2	1.5	1.5
温度 $T$	273	273	273	1093	1093	1093	615	615
容積(面積 $A$ ) $V$	1	2.25	4	1	2.25	4	1	4
エントロピー $S$	1.00	1.81	2.39	2.39	3.20	3.77	1.81	3.20

被験者には、予め作成された分子運動パターンの内 2 種類ずつを左右に配置して同時に見せた。このとき、与えられた言語表現（後述）について、どちらの映像がより感覚的に強く感じるかを選ばせる一対比較実験を行った。比較に用いる分子運動パターンは後述の 8 種類を用意した。

#### 4. 2. 2 被験者に見せる分子の運動パターン

各 8 種類（a～h）のアニメーションのパターンについては表 4.1 に示した。ここでは、それぞれ、分子速度  $v$  から算出される温度  $T$  および分子が動き回る範囲の容積  $V$ （第 2 章では「体積」を用いたが、本アニメーション説明時には容量である事を意味する「容積」とした）の値（実際には面積  $A$  の値であるが、説明時には容積  $V$  と説明する）と、これらを用いて簡易的に算出したエントロピー値  $S$  を示した。エントロピーの計算値は後に感性量  $f$  との比較に用いた。それぞれの値の算出については次のように求めた。

まず、分子速度  $v$  より分子 1 個の運動エネルギーを  $1/2 \times mv^2$ （分子の質量  $m$  は全て等しく、1 とした）より算出した。パターン a の分子速度  $v$  は 1 としてこれを基準とした。各パターンの温度はそれぞれの運動エネルギーに線形関係にあるとして、まずパターン a を基準温度 270 として、各パターンの温度をそれぞれの運動エネルギー値に比例させて算出した。容積  $V$  については、アニメーション上では実際には 2 次元なので、分子が動き回る範囲の体積  $V$  を以下のような考え方で、面積  $A$  と置き換えて計算した。

$$k_B \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^N = k_B \ln \left( \frac{L_2^3}{L_1^3} \right)^N = k_B \ln \left( \frac{L_2^2}{L_1^2} \right)^{\frac{3}{2}N} = k_B \ln \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{3}{2}N} \quad (4.2.1)$$

式(2.3.22)より,

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}N} + k_B \ln \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{3}{2}N} = k_B \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{A_2}{A_1} \right)^{\frac{3}{2}N} \quad (4.2.2)$$

パターン a を基準容積 1 として各パターンの容積はその面積に比例させて算出した。しかし、概念上は体積の比較なので、実際に奥行きのある映像を実際に見

せた場合の感性量は異なることも考えられる．これについては，今後，コンテンツを3D立体視化して，分子を3次元空間で動作しているように見せる工夫をするなどして，分子の運動をより厳密に再現して実験することも考えているが，本論文では2次元平面による比較までとした．

エントロピーの算出値は次のようにして求めた．まず，パターンaのエントロピー値を1と置き，これを基準エントロピーとした．次に各パターンのエントロピー値は，aのエントロピー値1に対する比較の形で，aの隣のパターンのエントロピー値を決定し，更に，そのパターンに対する比較を行う形で順次隣のエントロピー値の決定をした．比較元と比較先の各パターンが持つエントロピー値の差を，温度が等しければ，式(4.2.2)の面積比を使って求め，容積が等しければ式(4.2.2)の温度比を使って式(2)の関係から求めて各パターンのエントロピー値を算出した．

被験者に対して，用意した8種類のパターン2種類の組み合わせ全てについて比較を行わせると被験者に対する負担が大きいのので，被験者をAおよびBの2つのグループに分け，それぞれAは(a,b,c,d,e,f)，Bは(a,c,d,f,g,h)の6種類ずつに分けて一対比較させた．

被験者のグループAおよびBに見せるパターンのバリエーションは，a,c,dおよびfの4つのパターンについては，両グループに共通とした．これら4つのパターンは，温度については273と1093，容積については1と4のそれぞれ2段階のバリエーションを基本とした総組み合わせの4種類であった．Aグループについては，温度は基本の2段階(273と1093)であるが，容積のみ1段階追加して3段階として，容積1と4の間に2.25の値を持つbおよびeの2パターンを追加した．また，Bグループについては，容積は基本の2段階(1と4)であるが，温度のみ1段階加えて3段階として，基本温度273と1093の間に615の温度を持つgおよびhの2つのパターンを追加した．これによって，AグループおよびBグループ共にそれぞれ6種類の分子パターンによる一対比較実験とした．

#### 4. 2. 3 比較する言語表現の種類

比較する言葉の種類については，第3章で議論した全ての言葉について調べることは被験者の負担を考えると難しい．したがって，代表として，「乱雑さ」，「ぼやけた感じ」，「激しさ」，「拡散の度合い」および「捕まえにくさの度合い」の5種類を選んだ．その他にも，「無秩序さ」，「均一さ」あるいは「コントラストの

なさ」など啓蒙書等に一般的に用いられている表現もあるが、今回は比較的に熱力学の教科書などで用いられることが多いと考えられる言葉を選定した。被験者には、これらの各言葉による表現に関して、提示された2つのアニメーションパターンのどちらがより強く感じるかを選ばせた。

#### 4. 2. 4 被験者

被験者は神奈川工科大学工学部機械工学科2年生、Aグループ70名、Bグループ72名の合計142名であった。被験者の学年は、実験の時点では、エントロピーについてはまだ授業等で学習していないため、その多くはエントロピーに関する正確な知識は持っていないと想定した。

### 4. 3 実験結果と検討

#### 4. 3. 1 実験結果

本実験はサーストンの一対比較法を採用し、比較した2種類のパターンの勝敗の勝率から、正規分布の $Z$ 値を求め、各アニメーションパターンについて1次元で表せる距離尺度値に変換した。この値を感性量 $f$ として、エントロピー値 $S$ と比較検討した。AグループおよびBグループごとに実験した結果について、各パターンの勝率を表4.2および表4.3に示した。各数値はそれぞれ各列（横）のパターンに対する各行（縦）のパターンの勝率を示した。

ここで、Bグループの「激しさ」のaとgの比較、およびAグループとBグループ共に「拡散」のaとfの比較において、全ての被験者が同じパターンの方を選んだ。この結果、これらの比較では、勝率が1および0となり、正規分布の $Z$ 値が無限大あるいは無限小となるため距離尺度値が求められなくなる。そこで、これらについては、便宜上、最少人数として1名が勝率0となった方を選んだことにして、再度勝率を算出した。

つぎに、各勝率から求めた正規分布の $Z$ 値の平均を求め、その値を感性量（距離尺度） $f$ としてA、Bのグループごとに表4.4および表4.5に示した。AグループおよびBグループに共通のa,c,d,およびfの4パターンについて、それぞれ別々に求めたAグループとBグループの感性量を比較してみると、最大で30%程度の違いが認められた。これは、Aグループに加えられたgおよびh、Bグループに加えられたbおよびeのそれぞれ2つのパターンによって他のパターンの感性量が影響を受けた可能性が考えられる。この影響を少なくするために、Aグル

表 4.2 Aグループの実験結果（各列に対する行の勝率）

アニメーションパターン:a b c d e f						
人数						
70						
乱雑さ						
	a	b	c	d	e	f
a		0.47	0.50	0.13	0.14	0.17
b	0.53		0.46	0.33	0.09	0.13
c	0.50	0.54		0.30	0.24	0.16
d	0.87	0.67	0.70		0.51	0.57
e	0.86	0.91	0.76	0.49		0.47
f	0.83	0.87	0.84	0.43	0.53	
ぼやけ						
	a	b	c	d	e	f
a		0.31	0.26	0.49	0.36	0.39
b	0.69		0.34	0.64	0.54	0.47
c	0.74	0.66		0.57	0.64	0.49
d	0.51	0.36	0.43		0.33	0.37
e	0.64	0.46	0.36	0.67		0.30
f	0.61	0.53	0.51	0.63	0.70	
激しさ						
	a	b	c	d	e	f
a		0.76	0.94	0.01	0.03	0.04
b	0.24		0.79	0.01	0.01	0.07
c	0.06	0.21		0.03	0.01	0.01
d	0.99	0.99	0.97		0.84	0.90
e	0.97	0.99	0.99	0.16		0.73
f	0.96	0.93	0.99	0.10	0.27	
拡散						
	a	b	c	d	e	f
a		0.01	0.03	0.23	0.04	0.01
b	0.99		0.01	0.91	0.34	0.06
c	0.97	0.99		0.97	0.93	0.39
d	0.77	0.09	0.03		0.01	0.01
e	0.96	0.66	0.07	0.99		0.03
f	0.99	0.94	0.61	0.99	0.97	
捕まえにくさ						
	a	b	c	d	e	f
a		0.49	0.46	0.11	0.13	0.30
b	0.51		0.50	0.20	0.11	0.17
c	0.54	0.50		0.30	0.24	0.07
d	0.89	0.80	0.70		0.56	0.51
e	0.87	0.89	0.76	0.44		0.49
f	0.70	0.83	0.93	0.49	0.51	

表 4.3 Bグループの実験結果（各列に対する行の勝率）

アニメーションパターン: a c d f g h						
人数						
72						
乱雑さ						
	a	c	d	f	g	i
a		0.49	0.08	0.10	0.17	0.31
c	0.51		0.35	0.08	0.39	0.18
d	0.92	0.65		0.53	0.85	0.65
f	0.90	0.92	0.47		0.79	0.86
g	0.83	0.61	0.15	0.21		0.54
h	0.69	0.82	0.35	0.14	0.46	
ぼやけ						
	a	c	d	f	g	i
a		0.33	0.46	0.32	0.53	0.24
c	0.67		0.75	0.60	0.75	0.51
d	0.54	0.25		0.24	0.44	0.25
f	0.68	0.40	0.76		0.75	0.32
g	0.47	0.25	0.56	0.25		0.22
h	0.76	0.49	0.75	0.68	0.78	
激しさ						
	a	c	d	f	g	i
a		0.86	0.01	0.04	0.01	0.29
c	0.14		0.01	0.01	0.03	0.07
d	0.99	0.99		0.93	0.96	0.99
f	0.96	0.99	0.07		0.68	0.97
g	0.99	0.97	0.04	0.32		0.89
h	0.71	0.93	0.01	0.03	0.11	
拡散						
	a	c	d	f	g	i
a		0.06	0.29	0.01	0.49	0.06
c	0.94		0.92	0.19	0.92	0.36
d	0.71	0.08		0.01	0.60	0.01
f	0.99	0.81	0.99		0.99	0.68
g	0.51	0.08	0.40	0.01		0.03
h	0.94	0.64	0.99	0.32	0.97	
捕まえにくさ						
	a	c	d	f	g	i
a		0.39	0.11	0.15	0.06	0.21
c	0.61		0.21	0.13	0.29	0.13
d	0.89	0.79		0.49	0.93	0.68
f	0.85	0.88	0.51		0.76	0.89
g	0.94	0.71	0.07	0.24		0.50
h	0.79	0.88	0.32	0.11	0.50	

表 4.4 A グループの感性量  $f$  (距離尺度値) 被験者 70 名

		乱雑さ	ぼやけ	激しさ	拡散	捕まえにくさ
パターン	a	-0.64	-0.37	-0.71	-1.75	-0.60
	b	-0.60	0.10	-1.15	-0.12	-0.59
	c	-0.42	0.31	-1.73	1.43	-0.52
	d	0.46	-0.26	1.71	-1.38	0.55
	e	0.60	-0.04	1.18	0.19	0.57
	f	0.60	0.25	0.70	1.63	0.59

 表 4.5 B グループの感性量  $f$  (距離尺度値) 被験者 72 名

		乱雑さ	ぼやけ	激しさ	拡散	捕まえにくさ
パターン	a	-0.84	-0.33	-1.12	-1.19	-0.99
	c	-0.59	0.41	-1.78	0.63	-0.68
	d	0.65	-0.42	1.96	-1.00	0.79
	f	0.90	0.23	0.97	1.59	0.83
	g	-0.10	-0.41	0.63	-1.14	-0.01
	h	-0.03	0.52	-0.66	1.12	0.05

 表 4.6 A・B 混合の感性量  $f$  (距離尺度値) A, B 混合した被験者 142 名

		乱雑さ	ぼやけ	激しさ	拡散	捕まえにくさ	エントロピー $S$
パターン	a	-0.79	-0.31	-0.88	-1.52	-0.72	1.00
	b	-0.74	0.14	-1.29	-0.28	-0.71	1.81
	c	-0.54	0.35	-1.84	0.92	-0.59	2.39
	d	0.61	-0.29	1.87	-1.05	0.63	2.39
	e	0.73	-0.05	1.33	0.36	0.66	3.20
	f	0.72	0.26	0.85	1.65	0.68	3.77
	g	-0.09	-0.29	0.68	-1.39	0.02	1.81
	h	-0.07	0.41	-0.75	1.29	0.03	3.20

表 4.7 温度および容積変化別の言語表現の的確性比較

	変化する変数				
	温度(強度)		容積(容量)		両方
比較するパターンおよびその大小	$a < d$	$c < f$	$a < c$	$d < f$	$a < f$
乱雑さ	○	○	○	○	○
ぼやけた感じの度合い	○	×	○	○	○
激しさ	○	○	×	×	○
拡散の度合い	○	○	○	○	○
捕まえにくさ	○	○	○	○	○

表 4.8 相関係数による比較

	乱雑さ	ぼやけ	激しさ	拡散	捕まえにくさ	エントロピー $S$
エントロピー	<b>0.76</b>	0.60	0.37	<b>0.85</b>	<b>0.74</b>	1.00
温度	<b>0.99</b>	-0.14	0.92	0.23	<b>0.99</b>	0.70
容積	<b>0.09</b>	0.97	-0.39	0.97	<b>0.05</b>	0.70

ープとBグループのデータを統合して検討を行った。統合の仕方としては、まず、AとBグループに共通のa,c,d およびfについてはAとBグループ混合の被験者全員(142名)のデータを使って感性量を求める(表4.6の網掛け部分)。次に、容積がaとcの間に位置するbについては、Aグループ(表4.4)のa,cおよびbの結果を使って、AとBグループ混合(表4.6)のaとcの間に比例配分によって内挿させてbの感性量fを補間する。eについても同様に、Aグループ(表4.4)のd,fおよびeの結果を使ってAとBグループ混合(表4.6)のeの値を補間した。さらに、gおよびhについても同様に、Bグループ(表6)でこれらを挟み込むデータaとd、およびcとfを用いて、AとBグループ混合(表4.6)に対応させたgおよびhの感性量を補間した。

#### 4.3.2 検討事項1

第2章および第3章で論じたように、エントロピーは容量依存の性質と強度依存の性質の両方を併せ持っている。したがって、真にエントロピーの性質を表現できる言語表現であれば、この両方の変化に相関性を示すと考えられる。そこで、容量の変化である容積変化と強度の変化である温度変化について、表4.6の数値



から、それぞれの言語表現による各パターンの感性量  $f$  が温度変化あるいは容積変化に相関しているかどうかの検討を行った。

まず、表 4.7 は、エントロピーの大小と感性量の大小の関係が一致しているかどうかについて、a,c,d および f の 4 つの基本パターンについて比較した結果を示した。温度が変化したことによるエントロピーの大小については、それぞれエントロピー値が  $a < d$  と  $c < f$  となる関係について、また、容積が変化したことによるエントロピーの大小については、それぞれエントロピー値が  $a < c$  と  $d < f$  となる関係について検討した。表 4.7 中、大小関係がエントロピー値と同じであれば「○」、異なれば「×」で示した。この結果、「ぼやけた感じの度合い」については、温度は c より f の方が高いにも関わらず、感性量はその逆になっている。また、「激しさ」については、容積がそれぞれ c の方が a より大きく、また d の方が f より大きいにも関わらず感性量はその逆となっていることが分かった。このことから、「ぼやけた感じの度合い」と「激しさ」についてはエントロピーの変化を完全に表現できない可能性が示された。その他の「乱雑さ」、「拡散の度合い」および「捕まえにくさ」については、全て温度の強弱も容積の大小も順位的には矛盾なく表現できているという結果になり、これらについてはエントロピーの大小を比較する言語表現としての可能性を示した。

#### 4. 3. 3 検討事項 2

次に、検討事項 1 をより定量的に検討するために、表 4.6 における各言語表現による各パターンの感性量  $f$  (各列の並び:縦方向) とエントロピー値  $S$  の間の相関係数を求め、表 4.8 に示した。また、同表には温度および容積に対する相関係数も示した。この結果、エントロピー値と感性量の相関係数が最も高いのは、「拡散の度合い」の 0.85 であった。次に「乱雑さ」と「捕まえにくさ」が 0.76, 0.74 と高い相関係数の値となった。この 3 種類の言語表現に関してはエントロピーとの相関係数を見る限りにおいてはエントロピー値を非常に良く表しているといえる。しかし、それぞれ温度変化と容積変化に対する相関係数を比較すると、「乱雑さ」および「捕まえにくさ」共に、温度変化に対しては 0.99 というほぼ完全相関に近い相関性を示しているが、容積変化に対してはほとんど相関性が見られない。この結果から、「乱雑さ」については 3 章での仮説のように、強度依存のエントロピー変化に対しては正確だが容量依存のエントロピー変化に対しては表現できていないと見ることができる。したがって、科学啓蒙書や教養書等においてエン

トロピーの指標であると記されることが多い「乱雑さ」は、エントロピーの本質を感性的には十分に表現していない可能性が高くなったといえる。

次に、「捕まえにくさ」については、第3章で論じた検討では、強度依存および容量依存のエントロピーの両方に依存性を示すと予想したが、予想に反して強度依存のエントロピーに対してのみ相関性を示す結果となった。これについては、次のように考えた。即ち、「乱雑さ」や「拡散の度合い」といった言語表現は対象の状態を直接表現しているのに対し、「捕まえにくさ」は自身の行為の容易さ（あるいは困難さ）を示す言葉であると考えられる。そのため、判断に際して観察者自身が分子を実際に捕まえることを想像するという論理的思考過程が必要である。この過程において、容量依存のエントロピーにおける容積が広がったことによる捕まえにくさを想像しづらく、そのため「捕まえにくさ」と容量依存のエントロピーに強い相関が見られなかったのではないかと考える。このように、「捕まえにくさ」という表現は捕まえるという行為を想像した上で判断するため「拡散の度合い」等の画像の状態を直接表す表現とは明らかに異なる次元での表現であるといえる。したがって、感性という視点から見れば、今回の実験の結果においては、「捕まえにくさ」と「乱雑さ」や「拡散の度合い」と同じ基準で比較することは難しかったのではないかと考える。このことに関しては第6章での検討課題とする。

次に、「ぼやけた感じの度合い」については容積変化に対しては0.97という非常に高い相関性を示しているが、温度変化に対しては相関が見られない。このことから、第3章で論じたように、「ぼやけた感じの度合い」については、容量依存エントロピーを表現するのに適した言語表現であると言える。更に、「激しさ」に関しては、温度変化に対して0.92という高い相関性が見られるのに対して、容積変化に対しては-0.39というマイナス相関を示している。このことから、「激しさ」は強度依存エントロピーを表現するのに適した言語表現であると考えられる。

また、「拡散の度合い」については、第3章での仮説のように、容積に対して非常に高い相関性を示すが、温度に対しては高い相関性は示していない。しかし、「乱雑さ」および「捕まえにくさ」に比較して、容量依存性と強度依存性の両方のエントロピー変化に対して共に正の相関性係数を持っている。エントロピー値に対する相関係数も最も高いので、「拡散の度合い」は比較的に見れば、エントロピーの本質と相関性の高い表現といえる。

#### 4. 4 第4章のまとめ

本章では、第3章で論じた、これまで一般的に用いられてきた言語表現がエントロピーの概念を十分に表現していないのではないかという仮説を検証するために、分子の運動を再現した粒子のアニメーションを作成し、その映像を使って、数種類の言語表現による感性量とエントロピー値との相関関係を調べる実験を行った。その結果、「乱雑さ」や「ぼやけた感じの度合い」といった、これまで啓蒙書などに一般的に用いられてきた表現が、それぞれ「強度依存エントロピー」と「容量依存エントロピー」といったエントロピー概念の一部に偏って相関していることが分かった。このことから、これらの表現が感性的にはエントロピー概念を十分には表現していないという第3章の仮説が裏付けられた。また、「捕まえにくさ」については、その判断は感性によるものではなくて、論理的な思考が働く可能性が示唆された。

## 第5章

# 2値画像によるエントロピー値と 言語表現による感性量との 相関分析

### 5. 1 はじめに

第4章では、熱力学的現象におけるエントロピー変化をより感覚的に表現できる言語表現を検討するために、分子の運動を再現するCGアニメーションを用いて実験を行った。そこでは、熱力学的な立場で、分子運動論に基づいた動的な現象に対するエントロピー変化を対象に、より適した言葉による表現に関する検討を行った。一方で、第2章で述べたように、エントロピーの概念は、熱力学に限らず情報科学の分野においても用いられる。序論でも述べたが、これら情報理論に基づく情報エントロピーは、熱力学的現象のエントロピーとは数式的な形が等しいだけで、本質的には異なった概念であるとする考え方がある<sup>11),18)</sup>。一方で、情報理論におけるエントロピーが自然現象である分子運動の現象も内包する形で本質的には全く同じものであるとする考え方もあり<sup>8),12),14)</sup>、これら2つの対立する考えは長年議論されてきたが、近年では後者の考え方が支配的になっている。本研究も、基本的に後者の考え方に基づいて研究を進めている。

熱力学的現象のエントロピーが分子の運動、即ち、動的状態に基づいているとすれば、シンボル・記号のバリエーションに基づく情報エントロピーは、静的な状態を表現するエントロピー値であると考えることができる。本研究では、熱力学的現象のエントロピーであるか、情報エントロピーであるかに関わらず、エントロピーの本質に対する人間の感性量を明らかにするためには、静的現象でのエントロピー変化を含めたエントロピー値と感性量との比較検討も必要であると考えた。そこで本章では、静的な現象として2値画像による表現に着目し、2値画像エントロピー値と言語による感性量との相関性について検討を行う。また、2値画像のエントロピー値については、情報理論に基づいた計算方法は知られているが<sup>56),67),68)</sup>、人間が2値画像のエントロピー変化に対して感じる感性量と相関性のあるエントロピー値の算出法については、著者らが調べた範囲では見当たらない。そこで、エントロピー算出法の違いと言語表現との適合性についても検討し、2値画像に対するヒトの感性に近いエントロピー値算出方法についても検証する。

### 5. 2 白黒2値画像のエントロピー値算出方法

エントロピーに関する啓蒙書や解説書等<sup>5),82)</sup>では、水に垂らしたインクが時間とともに拡散していく様子をイメージさせて、その不可逆性について論じたり、ペイントされた文字や模様が風雨による風化などで経年とともにぼやけてきて読

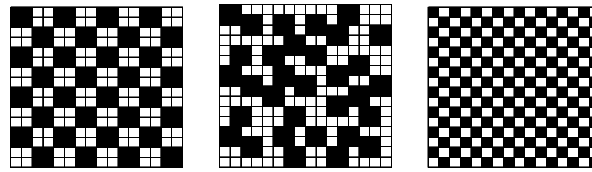


図 5.1 白と黒の 2 値画像例（白と黒の画素は同数）

み取れなくなってしまう、あいまいさが増すことを例にして、エントロピーが増大することの意味を説明する方法が頻繁に使われる。また、これらの現象をモデル化して説明する際には、図 5.1 に示すような白と黒の 2 値画像（白と黒の画素は同数）を用いて、「無秩序さ」、「乱雑さ」、「コントラストの無さ」「あいまいさ」および「拡散の度合い」などの言葉を使って説明することが多い。一方で、2 値画像について、エントロピーを計算する方法は多様である。既に、情報科学および画像処理の分野においては、情報量の観点から 2 値画像の情報エントロピーを算出する手法が確立している<sup>67)</sup>。しかし、言語表現にもとづく感性量と画像のエントロピー値との対応関係の視点に立つと、言語表現から得る感性量としてのエントロピー値をどのような計算方法で計算するべきかを示す指針はない。そこで、白黒 2 値画像を用いたエントロピー概念の表現方法を評価する際に適しているエントロピー値の算出方法について以下に検討した。

### 5. 2. 1 情報量の求め方に基づいた画像のエントロピー算出方法

情報科学の分野では、画像データの情報エントロピー値（平均情報量）が算出できる<sup>67)</sup>。例えば、白黒 2 値画像の場合、情報エントロピー値の算出は、1, 2 行×2 列, 4 行×4 列,・・・等、小単位の画素の 2 次元的なデータをシンボルとにおいて、その画素範囲のビット値を輝度値として、同じ輝度値を持つシンボルの生起確率を使ってエントロピー値を算出する。

この算出方法によるエントロピーを使って、画像の感性評価の指標に使っている例もある<sup>53)~55)</sup>。この場合、一般的には、画像の認識度や見にくさの評価等に用いられることが多い。しかし、本研究が対象としている、エントロピーの概念自体の表現方法の評価に、この算出方法をそのまま用いることができるかどうかは検討を要すると考える。

情報エントロピーについては、第 2 章で既に述べたように平均情報量として、

次式[既出の式(2.3.44)]で求めることができる。

$$S = -\sum p_i \cdot \log_2 p_i \quad (5.2.1)[(2.3.44)]$$

ここで、 $p_i$ には、 $\sum p_i = 1$ の条件がある。

また、すべての情報を伝達するシンボルが等しい生起確率を持っていたとすると、 $p = 1/M$ が成り立つので（ここで  $M$ ：シンボルの総数）,

$$S = \log_2 M \quad (5.2.2)[(2.3.45)]$$

となることも、既に第2章で既出[式(2.3.45)]である。

しかし、この式より求められるエントロピーは、シンボルの生起確率を使って求めるため、シンボルを何にするのか、その大きさをどの程度にするのか、によって様々な値となる。

画像のエントロピー値の算出については、前述のように、サイズ  $I \times J$  の画像に対し、1画素あたりの輝度値  $Z$  ビットの画像が発生する情報源の場合、輝度値をシンボルとして画像の総画素数を  $N_{pic}$ 、輝度値  $Z_i$  の画素数を  $N_i$  とすると、エントロピー  $S$  は、

$$S = -\sum_{i=0}^{2^Z-1} \frac{N_i}{N_{pic}} \log_2 \left( \frac{N_i}{N_{pic}} \right) \quad (5.2.3)$$

で求まる。

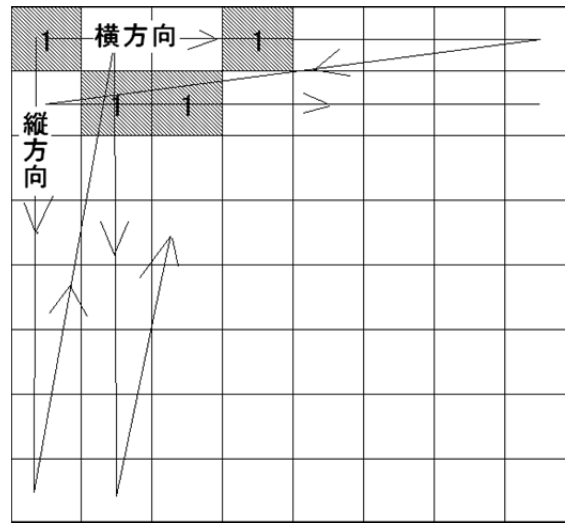


図 5. 2 2 値画像のエントロピー計算方向

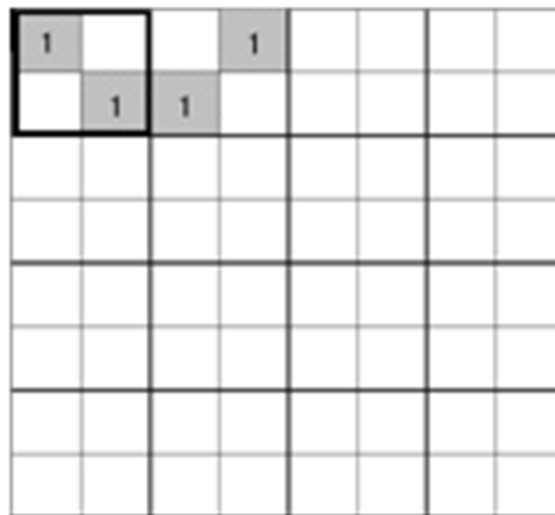


図 5. 3 2×2 の 4 画素分を輝度値シンボルとする計算方法

式(5.2.1)，式(5.2.2)および式(5.2.3)に基づいて，シンボルの取り方の違いによって以下(a)から(c)の 3 つのエントロピー算出法を検討した．尚，輝度をシンボルとしたこの計算アルゴリズムは，画像情報のエントロピーの算出方法として最も一般的に用いられる方法であり，前述のように，画像に対する認識度や見にくさなどの指標として用いられる<sup>53)～55)</sup>．

更に，ここでは，後述する(b)と(e)以外の算出方法においては，画像の 2 次元平面広がりに対する感性量との相関性を持たせるために，エントロピーの算出方向は，図 5.2 のように，横（列）方向と縦（行）方向について別々にエントロピー



を計算した後、これらを足して2で割ることで、縦方向と横方向の向きに依存しない平均エントロピー値を求めて評価することとした。

**(a) 画像の情報エントロピー① (1画素白と黒の1ビットをシンボルとしたエントロピー)**

式(5.2.3)において、画素1つ当たりをシンボルとおくと、白と黒の2種類(2値画像)の色なのでシンボルの輝度値  $Z$  は1ビットとなる。縦方向および横方向の1列毎にエントロピー値を求めその総体として画像全体のエントロピーを算出する。1列にいくつの黒い画素が入っているかが基準となるため、均等な散らばり具合を比較することになる。

**(b) 画像の情報エントロピー② ( $2 \times 2$ , 2ビットをシンボルとしたエントロピー)**

(a)と同様に式(5.2.3)を用いるが、図5.3のように、画像を  $2 \times 2$  の単位に区切り4画素分を1つのシンボルとして計算する。従ってシンボル輝度値  $Z$  は4段階2ビットとなる。このアルゴリズムによる計算値は、 $2 \times 2$  の4画素分をユニット化して1つの画素と考えたときの画素の輝度の多様性を示す値となるため、明るさに対する多様性の指標となると考える。このように、画素をユニット化してその面積を任意に設定することができるが、シンボル化する面積が増えるにつれて逆に画像の解像度が低下するため、本検討では(a)の1ビットと(b)の2ビット( $2 \times 2$ )の2種類までとした。

**(c) 画像の情報エントロピー③ (同一画の連なり長さをシンボルとしたエントロピー)**

(a)および(b)は輝度値をシンボルとしたのに対して、本方法は、黒の画素が横あるいは縦にいくつ連続して連なっているかをシンボル値  $Z$  とする。このアルゴリズムによると、長さの種類が多いほどエントロピー値は高くなる。したがって、連なり長さの種類が多様性を示す指標となる。

## 5. 2. 2 熱力学的現象の確率に基づく画像のエントロピー算出方法

エントロピーの啓蒙書などでは、エントロピーの概念について微視的状态数を用いて、確率論的な側面から説明することが多い。前述のインクの拡散の例はその一つである。そこで、画像のエントロピーを求める方法として、前述のような、情報理論に基づいたエントロピーの算出方法以外に、微視的状态数に基づいた2

値画像のエントロピー算出法を考えた。

第2章，既出の次式[(2.3.21)]のボルツマンの式において，

$$S = k \cdot \ln W \quad (5.2.4)[(2.3.21)]$$

この熱力学的現象の確率  $W$  を2値画像における黒いピクセルが出現する場合の数に置き換えてエントロピーを算出する方法として次の(d)および(e)を考えた。

(d) 黒い画素の連なる確率を基準としたエントロピー

黒い画素が生起する確率を  $1/2$  とすると，黒い画素が続けて生起する確率  $p_i$  は図5.4のようになる。ここで，黒い画素の1つの連なりを1個体として，前述の

$$\begin{aligned} & 1\text{個} \quad \blacksquare \quad 1/2 \\ & 2\text{個} \quad \blacksquare\blacksquare \quad 1/2 \times 1/2 = 1/4 \\ & 3\text{個} \quad \blacksquare\blacksquare\blacksquare \quad 1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/8 \end{aligned}$$

図 5.4 黒い画素（同一画素）が連続する確率

表 5.1 黒い画素の連続数の熱力学的現象の確率（16×16 画素）

画素の連続数	確率 $P$	熱力学的確率 $W$
1	0.5	32768
2	0.25	16384
3	0.125	8192
4	0.0625	4096
5	0.03125	2048
6	0.015625	1024
7	0.0078125	512
8	0.0039063	256
9	0.0019531	128
10	0.0009766	64
11	0.0004883	32
12	0.0002441	16
13	0.0001221	8
14	6.104E-05	4
15	3.052E-05	2
16	1.526E-05	1

情報理論のシャノンの定義に当てはめた場合、各個体個々が持つ情報量は第2章で記したように次式[既出(2.3.43)]で与えられる。

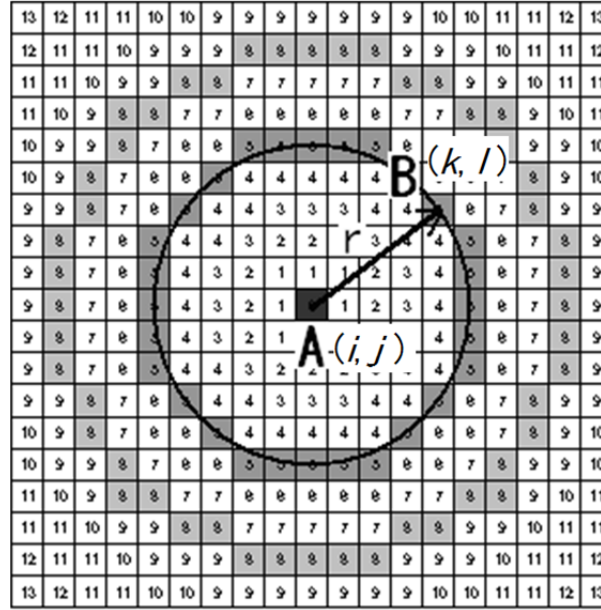
$$I_i = \log_2 \left( \frac{1}{p_i} \right) = -\log_2 p_i \quad (5.2.5)[(2.3.43)]$$

しかし、式(2.3.43)を式(5.2.1)[(2.3.44)]に適用し、エントロピー（平均情報量）を求めようとするとき、(a)、(b)および(c)の場合と異なり、 $\sum p_i = 1$  とならないため平均情報量とはならない。そこで表 5.1 のように 1 列（行）の最大量 16 画素の黒になる確率  $p_{16}$  を 1 とおいたときの各場合の確率比（ $p_i / p_{16}$ ）を熱力学的現象の確率  $w_i$  として求め、 $S = -\sum \ln w_i$  からエントロピーを求める。これは、16 画素連続して連なる場合のエントロピー値を基準エントロピーにしたことと等しい。このアルゴリズムによって算出される値は、黒の画素のまとまり具合を比較しており、連なれば連なるほど確率は低くなるためエントロピー値は低くなる。したがって、この値が高いほどより拡散していることを示している。

(e) 1 対ごとの黒画素間の距離を基準としたエントロピー

前述の(a)、(c)および(d)については、いずれも行ごとあるいは列ごとにエントロピーを算出し、列あるいは行の方向へ積算することで全体のエントロピーを求めた。画像情報として考えれば、結局、2次元平面のデータを数珠状に並べた1次元のデータとして扱うため、データ並びとしてのエントロピー値の算出方法としては問題ないとする（圧縮の方式によってこの積算方向が異なり、例えば、JPEG 画像の場合は、斜め方向にデータを繋げていく）。しかし、人間が2値画像を見るときは、2次元の広がりとして感じるはずであり、行および列ごとに計算する方法は、行と行あるいは列と列の境のつながり部分の関係を十分に反映しない。そこで、画素同士の距離を放射状に測ることで2次元平面方向にエントロピー値を算出する方法を考えた。

画像全体に黒い画素が生起する確率が等しく与えられているとき、A および B の2つの黒い画素を仮定し、A と B の2つの間の距離に着目すると、A に対する B の生起確率（画素の数）は2つの間の距離を半径  $r$  とする円周長さ  $l$  に比例する。図 5.5 は1画素分の距離を1としたとき、中心に位置する画素 A から同じ距離にある画素 B が何個存在できるかを示した図である。各画素に示した値は中心からの距離を示している。例えば、中心から5の長さで幅1の面積の中、即ち、


 図 5.5 画素 A に対する画素 B の間隔距離  $r$  の増加に伴って増加する存在確率

半径 4.5 から 5.5 の中に画素の中心が入る画素は 28 個ある．同様に，中心からの距離が更に離れて 7.5 から 8.5 の中に中心が存在する画素は 48 個ある．このように中心から離れるに従い，その距離に存在できる画素が増える．したがって，2つの画素間の距離が増えることで，存在する確率が増えることになる．この確率を熱力学的現象の確率とすれば，熱力学的現象の確率は 2つの画素間の長さを半径  $r$  とする円周長さに比例し，即ち， $r$  に比例する．したがって A と B，2つの画素間のエントロピー  $S_{AB}$  は， $W=r$  として，次式によって求まる．

$$S_{AB} = \ln r \quad (5.2.6)$$

更に，実際のプログラムにおいては次式を用いる．

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n Z_{i,j} \cdot Z_{k,l} \cdot \ln \left( \sqrt{(k-i)^2 + (l-j)^2} \right) \quad (5.2.7)$$

ここで， $i, j, k, l$  は図 5.5 中に示したように，それぞれ  $A(i, j)$ ， $B(k, l)$  の座標値である．また， $Z$  は黒の画素のときは 1，白の画素のときは 0 とする．更に， $k = i$  かつ  $l = j$  の場合，即ち，同じ画素同士の場合の計算は行わない（平方根

内を0にしない). このアルゴリズムで算出された値は黒い画素の空間的広がり直接示すものである. 尚, ここでの考え方は, 分子運動論において, マクスウェルの速さ分布を求めるときに, 球座標上で放射状に広がる速度分布の確率密度関数を半径方向に積分する際の考え方と類似する.

### 5. 3 エントロピーの算出値と言語によって与えられる感性量との相関性を調べる実験

前節 5.2 では, 2 値画像のエントロピー値を算出する方法として, 画像データの平均情報量を求める手法と, 熱力学現象の説明に用いられてきた熱力学的現象の確率 (微視的状态数) を求める手法の 2 つについて論じた. ここでは, これらによるエントロピーの計算値が, 言葉によって与えられる感性量とどのような関係を持つのかに着目した. そこで, 前節で検討した 2 値画像のエントロピー算出方法によるエントロピー値と, 言葉によって与えられる感性量との相関関係を調べる実験を行った. 比較に用いる言葉は, 被験者への負担を最小限にするため 3 つに絞った. 使用する言葉は以下のように選定した.

#### 5. 3. 1 比較に用いる言葉の選定

先に述べたように, 前章において, 熱力学的現象におけるエントロピーに着目して, 分子運動を表現した粒子のアニメーションを被験者に見せて, 与えられた言葉に対する感性量と分子の速度および運動範囲から計算されたエントロピー値との相関性を調べた. エントロピー値を変化させる独立変数として, それぞれ分子の速度 (温度) と面積 (体積) を独立して変化させて比較したところ, 「乱雑さ」および「捕まえにくさ」等から感じる感性量は強度依存エントロピー (温度変化によるエントロピー変化) に対しては相関が高いが, 容量依存エントロピー (体積変化によるエントロピー変化) に対しては相関性がほとんどなかった. これとは逆に, 「拡散の度合い」や「ぼやけた感じの度合い」等から感じる感性量は容量依存エントロピーには相関性があるが, 強度依存エントロピーに対しては相関性が少ないことがわかった. このことから, 言葉による感性量は, 強度依存エントロピーと容量依存エントロピーのどちらかに依存する可能性が高いことがわかった. そこで, 強度依存エントロピーおよび容量依存エントロピーを表現する言葉をそれぞれ 1 つずつ選定することとした.

まず, 容量依存エントロピー値に相関する言葉については, 前章において, 容

量依存エントロピー値に最も相関係数の高かった「拡散の度合い」を採用した。次に、強度依存エントロピー値に相関する表現に関しては、「乱雑さ」と「無秩序さ」を候補とした。前章においては、「乱雑さ」が強度依存エントロピー値と相関が高かった。著者らが行った、他の検討<sup>95)</sup>では、強度依存エントロピー値に対しては、「無秩序さ」による感性量は「乱雑さ」による感性量と同じ相関性を示し、「無秩序さ」と「乱雑さ」は概ね同等の表現であると考えた。また、エントロピーの啓蒙書などでは、白黒2値画像を使った説明において「無秩序さ」という言葉による表現でエントロピーの概念を説明しているものが多いことから、本実験では「無秩序さ」を強度依存エントロピー値に相関する表現として採用した。更に、前章で検討した「捕まえにくさ」は、被験者が頭の中で、動き回る粒子を想像する事が必要で、論理的な思考が働き、感性による判断ではなくなる可能性がある。しかし、エントロピーの概念を説明する場合には有効な表現であると考えられるため、3つ目の言葉による表現として「捕まえにくさ」を採用した。

### 5.3.2 実験方法

**被験者** 被験者は神奈川工科大学工学部機械工学科2年生、77名であった。いずれも、本学における授業の一環として本実験に参加した。被験者の学年は、実験の時点では、エントロピーについてはまだ講義等で学習していないため、その多くはエントロピーに関する知識は持っていないと想定した。

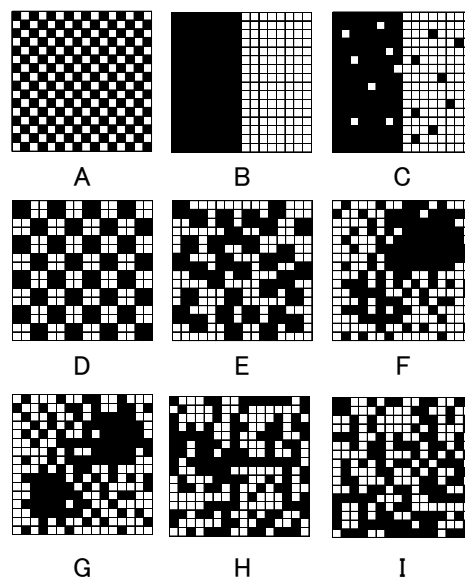




















図 5.6 実験に用いた 9 種類の 2 値画像パターン

画像パターン	B										
A 											
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	B 									
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	B 								
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	B 							
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	B 						
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	B 					
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	B 				
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	B 			
A 	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	A 問1 B A 問2 B A 問3 B	B 		

問: 行対列の各画像パターンについて、以下の質問に対する感じが強い方を選んで、AかBに○をつけてください

問1. 無秩序な感じの強い方

問2. 拡散の度合いの強い方

問3. 黒い部分を捕まえにくい感じの強い方

図 5.7 1対比較法による画像パターンの比較記入シート

**手続き** 実験は、図 5.6 に示した 9 種類の 2 値画像を 2 種類ずつ計 36 の組み合わせについて比較し、「拡散の度合い」「無秩序さ」および「捕まえにくさ」のそれぞれ 3 種類の言葉が与えられたときに、どちらの方がより強く感じるかを選ばせる 1 対比較法による実験を行った。図 5.7 に実験に使用した 1 対比較法による画像パターンの比較記入シートを示した。比較記入シートにおける画像の並び順は、ランダムに 7 種類を作成した。各被験者はそのうちの 1 つを配布され、それに対して回答した。

### 5. 3. 3 実験結果

表 5.2 に、1 対比較による各列に対する行の勝率を、3 種類の言葉別に示した。比較した 2 種類の画像パターンの勝敗の勝率から、正規分布の  $Z$  値を求め、各画像について 1 次元で表せる距離尺度値に変換した。この値を感性量（心理量） $f$  として、前節 5.2 で検討した 5 種類のエントロピーの算出値  $S$  と比較した。図 5.8 に、5 種類の計算法によるエントロピーの計算値の比較、および図 5.9 に画像ご

表 5.2 1 対比較実験の結果（各列に対する行の勝率）

拡散の度合いの強い方									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		1.33	0.81	1.18	0.38	0.28	0.03	0.21	0.23
B	-1.33		-1.18	-1.05	-1.19	-1.01	-1.24	-1.18	-1.25
C	-0.81	1.18		-0.53	-1.18	-1.26	-1.13	-1.41	-1.06
D	-1.18	1.05	0.53		0.27	0.10	0.02	-0.28	-0.14
E	-0.38	1.19	1.18	-0.27		0.49	0.45	-0.45	-0.62
F	-0.28	1.01	1.26	-0.10	-0.49		-0.42	-0.64	-1.06
G	-0.03	1.24	1.13	-0.02	-0.45	0.42		-0.77	-1.11
H	-0.21	1.18	1.41	0.28	0.45	0.64	0.77		-0.49
I	-0.23	1.25	1.06	0.14	0.62	1.06	1.11	0.49	
無秩序な感じの強い方									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		0.38	-1.19	-0.08	-1.26	-1.07	-1.25	-1.13	-1.12
B	-0.38		-1.42	-0.48	-1.42	-1.19	-1.18	-1.34	-1.12
C	1.19	1.42		0.77	-0.59	-0.81	-1.01	-1.06	-1.18
D	0.08	0.48	-0.77		-1.18	-1.18	-1.12	-1.06	-0.99
E	1.26	1.42	0.59	1.18		-0.60	-0.57	-0.95	-1.17
F	1.07	1.19	0.81	1.18	0.60		-0.05	-0.28	-0.32
G	1.25	1.18	1.01	1.12	0.57	0.05		-0.25	-0.66
H	1.13	1.34	1.06	1.06	0.95	0.28	0.25		-0.20
I	1.12	1.12	1.18	0.99	1.17	0.32	0.66	0.20	
黒い部分を捕まえにくい感じの強い方									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A		1.18	0.52	0.90	0.31	0.28	0.00	0.20	-0.17
B	-1.18		-1.06	-1.04	-0.85	-0.90	-1.24	-1.11	-1.41
C	-0.52	1.06		-0.28	-0.59	-0.73	-0.57	-1.32	-0.76
D	-0.90	1.04	0.28		-0.57	-0.17	-0.18	-0.90	-1.09
E	-0.31	0.85	0.59	0.57		0.21	0.34	-0.68	-0.99
F	-0.28	0.90	0.73	0.17	-0.21		-0.27	-0.76	-0.80
G	0.00	1.24	0.57	0.18	-0.34	0.27		-0.63	-0.93
H	-0.20	1.11	1.32	0.90	0.68	0.76	0.63		-0.44
I	0.17	1.41	0.76	1.09	0.99	0.80	0.93	0.44	



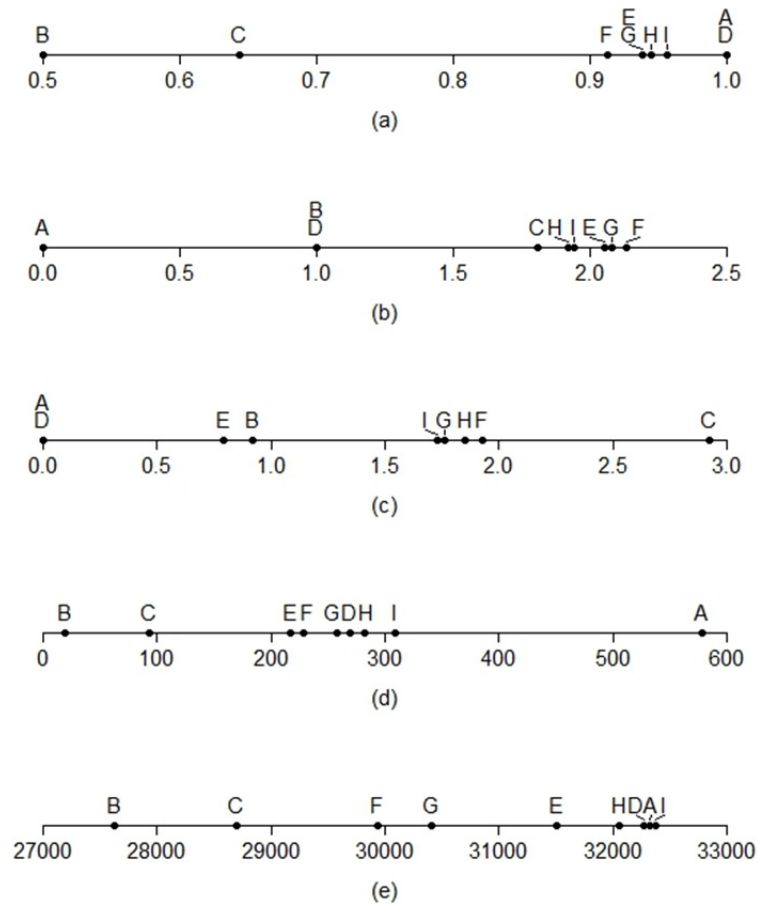


図 5.8 5 種類の計算法によるエントロピー  $S$  の計算値の比較

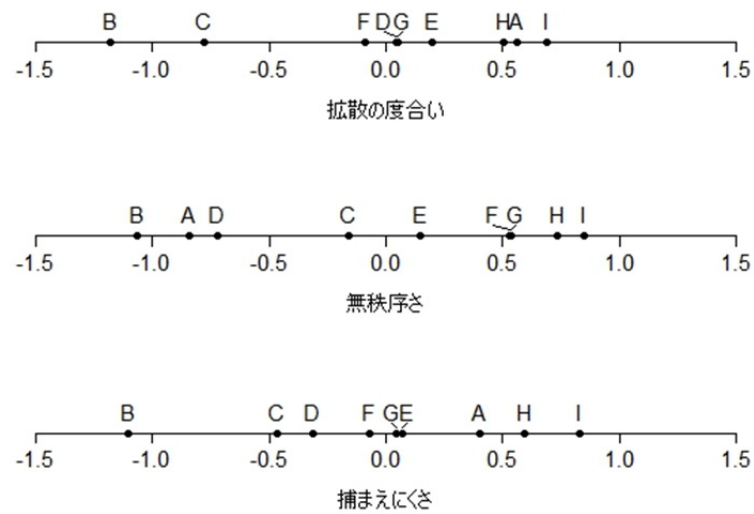


図 5.9 3 種類の言葉による感性量  $f$  の比較

との3種類の言葉による感性量  $f$  を示した。また、表 5.3 には、それぞれ各エントロピー計算値  $S$  と感性量  $f$  の値、およびそれらを2値画像の図と共に順位ごとに並べた。図 5.8 および表 5.3 より、計算方法の違いにより、順位およびエントロピー値の差が大きく異なっていることが分かる。特に、画像 A と D の順位が計算法によっては上位と下位の逆の位置にある。また、言葉による感性量の比較においても、図 5.9 および表 5.3 では、言葉による表現別に順位および尺度距離が共に大きく異なっており、画像 A については、計算方法の比較と同様に、言葉によってその順位が上位と下位に大きく分かれる。また、表 5.4 には、それぞれ「無秩序さ」「拡散の度合い」および「捕まえにくさ」の感性量に対する5種類のエントロピー計算値との相関係数を示した。

#### 5.3.4 実験結果の検討









































































前述のように、エントロピーの算出値  $S$  および感性量  $f$  共に、画像 A および D が、算出方法や言葉による表現で順位が大きく異なっている。このことに関して以下のような考察を行った。

##### 5.3.4.1 エントロピーの計算方法に関する考察

表 5.3 および図 5.8 のエントロピーの計算方法の比較においては、計算法(a), (d)および(e)については、画像 A および D が共に順位が比較的上位にあるが、計算法(b)および(c)においては、下位にある。しかし、計算法(b)および(c)では画像 A の値が0となることは明らかである。即ち、計算法(b)では、4画素分を1つのシンボルとしたが、この場合、画像 A においては全てが同じ輝度値になるため、シンボルは1通りしかなく、エントロピー値は0となる。また、連なり長さをシンボルとした計算法(c)においても、A については連なり長さのパターンは、画素1つ分の長さの1通りしかないため計算法(b)と同様にエントロピー値は0となる。一方、計算法(b)および(c)と同様にシンボルの生起確率を基準とする計算法(a)においては、逆に画像 A は上位の高いエントロピー値となった。このように、皆シンボルの生起確立を基準とし、シンボルの多様性を計るアルゴリズムで計算される計算法(a), (b)および(c)は、そのシンボルの取り方で全く異なった結果となった。この理由としては、計算法(a)は、シンボルを最小の画素単位まで小さくしたために、輝度値が1ビットとなり、輝度の多様性よりも白と黒の比率によるエントロピー値を計算することになったからではないかと考える。

計算方法(d)については、基本的に隣に連なる画素の確率を基準としている。黒および白の画素の隣に同じ色の画素が連なるにしたがって確率が低くなるため、同じ色の画素が連なる画像ほどエントロピーは低くなる。このことから、Aの画像は白と黒が交互に現れ、同じ色が連なることがないため、エントロピーは最も高い値となる。

 表 5.3 各エントロピー計算値  $S$  と感性量  $f$  およびその順位

順位	エントロピーの計算方法					言葉による表現		
	(a)輝度シンボル	(b)4×4シンボル	(c)連続シンボル	(d)連続の確率	(e)2極間長さ	拡散の度合い	無秩序さ	捕まえにくさ
1	 D $S = 1.00$	 F $S = 2.13$	 C $S = 2.92$	 A $S = 578.0$	 I $S = 32368$	 I $f = 0.69$	 I $f = 0.85$	 I $f = 0.83$
2	 A $S = 1.00$	 G $S = 2.08$	 F $S = 1.93$	 I $S = 308.3$	 A $S = 32324$	 A $f = 0.56$	 H $f = 0.73$	 H $f = 0.60$
3	 I $S = 0.956$	 E $S = 2.05$	 H $S = 1.85$	 H $S = 281.8$	 D $S = 32269$	 H $f = 0.51$	 G $f = 0.53$	 A $f = 0.40$
4	 H $S = 0.944$	 I $S = 1.94$	 G $S = 1.76$	 D $S = 269.7$	 H $S = 32056$	 E $f = 0.20$	 F $f = 0.53$	 E $f = 0.07$
5	 E $S = 0.938$	 H $S = 1.92$	 I $S = 1.73$	 G $S = 257.7$	 E $S = 31502$	 G $f = 0.05$	 E $f = 0.15$	 G $f = 0.05$
6	 G $S = 0.938$	 C $S = 1.81$	 B $S = 0.92$	 F $S = 228.8$	 G $S = 30414$	 D $f = 0.05$	 C $f = -0.16$	 F $f = -0.07$
7	 F $S = 0.913$	 D $S = 1.00$	 E $S = 0.79$	 E $S = 216.7$	 F $S = 29934$	 F $f = -0.09$	 D $f = -0.72$	 D $f = -0.31$
8	 C $S = 0.644$	 B $S = 1.00$	 D $S = 0.00$	 C $S = 93.9$	 C $S = 28704$	 C $f = -0.78$	 A $f = -0.84$	 C $f = -0.46$
9	 B $S = 0.500$	 A $S = 0.00$	 A $S = 0.00$	 B $S = 19.3$	 B $S = 27629$	 B $f = -1.18$	 B $f = -1.07$	 B $f = -1.10$

## 5. 3. 4. 2 言葉による表現の感性量に関する考察

表 5.3 および図 5.9 の言葉による表現における感性量の比較において、画像 A に着目すると、「拡散の度合い」では感性量が高いが、「無秩序さ」では低くなっている。エントロピーの高さを表現するこれら 2 つの言葉に対する感性量について、画像 A の順位が大きく異なることは非常に興味深い結果であるといえる。

「拡散の度合い」について考えると、黒い画素が均一に並ぶ画像 A が高い感性量を示すことは論理的にも感性的にも矛盾は生じないと思う。一方で、「無秩序さ」については、1 つの考え方としては、画像 A は、インクが拡散する現象や、「覆水盆に返らず」のように 1 か所に閉じ込めておいた物が広範囲に広がってしまったと捉えたと、無秩序になったと考える事ができる。しかし、広がってはいるが、画像 A は正確に 1 画素ごとに黒の画素と白の画素が配列されているため、統率がとれていると考えれば、無秩序さは低いともいえる。

表 5.4 各言葉による感性量と各エントロピー計算値との相関係数

言葉表現	エントロピー計算方法					言葉による表現		
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	拡散	無秩序	捕まえ
拡散の度合い	0.92	0.02	-0.24	0.82	0.95		0.51	0.95
無秩序さ	0.41	0.83	0.61	0.05	0.30	0.51		0.67
捕まえにくさ	0.78	0.17	0.04	0.72	0.83	0.95	0.67	

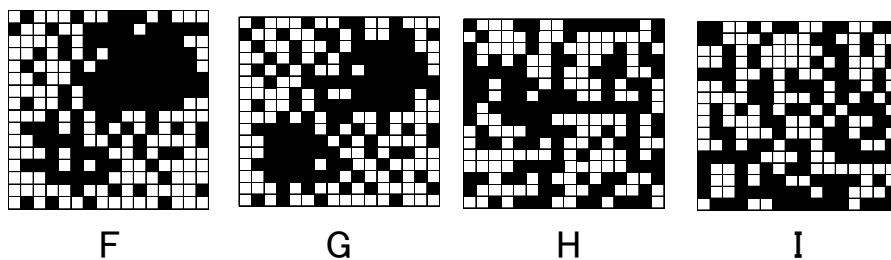


図 5.10 自然な表現による画像

表 5.5 2値画像 F, G, H, I のみを用いた比較による相関係数

言葉表現	エントロピー計算方法					言葉による表現		
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	拡散	無秩序	捕まえ
拡散の度合い	0.92	-0.96	-0.59	0.97	1.00		0.99	1.00
無秩序さ	0.87	-0.91	-0.54	0.94	0.97	0.99		0.99
捕まえにくさ	0.91	-0.95	-0.57	0.96	0.99	1.00	0.99	

ここで、仮に、この画像 A の画素が被験者にその形が見分けられないほど小さい粒子程度の大きさだった場合にどうであるかを考える。その場合は恐らく、被験者は、黒の隣にきつちりと白が配列されている特異性に気づかないため、秩序性は感じられず、広がったことに対する感性が働いて無秩序に感じるのではないかと考える。このことから、画像 A に対する「無秩序さ」による感性量が低くなった原因は、被験者が 1 つずつ均等な配置で、白と黒が整列する状態を関知したことによるもので、論理的な思考が働き、画像 A の多様性の少なさに気づいたからではないかと考える。そしてこれは、被験者が「無秩序さ」の比較において上位にある画像 I と H,あるいは画像 G と F を比較するときに働いた感性とは異なった感性で比較した結果ではないかと考える。その理由としては、著者の主観による仮定であるが、例えば、画像 G と F を比較した場合、F の方が黒の画素の塊が大きく、まとまった印象が強いが、画像 G に関しては分散している印象が強い。したがって、G の方に、より「無秩序さ」を感じ、高い感性量を与えたと考えることができる。もし、この基準で画像 A を見た場合、前述の、形が見分けられない程小さい画素であった場合と同じように、画像 A に対しては「無秩序さ」が大きく感じられると思われるので、画像 A の感性量はもっと上位に来るはずである。しかし、実際にはそうならなかった要因は、画像 A や D の白と黒の画素が規則正しく並んだ特異性、即ち自然界に存在しにくい、パターン化された画像だからではないかと考える。このことから、以下では、画像 A のような論理的な思考が働く可能性のある画像を排除して再検討した。

### 5. 3. 4. 3 3種類の言葉に共通な感性量に順位づけられる2値画像

画像 A のように画素の間隔が均等に配置されている画像は D である。また、画像 B および C においても、自然界にある現象としては不自然な配置であると考ええる。更に、画像 E についても、黒い画素が 4 つずつ隣り合わせに発生して存在する確率も非常に低いと考えられる。したがって、これらエントロピーの概念に基づいて恣意的に作られた画像 A,B,C,D および E については、論理的思考が働きやすいと考えた。このことから、これら 5 つの画像を取り除くと、図 5.10 の画像 E,F,G および H の 4 つが残る。これらを見ると、いずれも自然に存在する現象、例えば実際の写真の一部分などにあり得る画像であると考えられる。そして、これら 4 つの画像について表 5.3 において比較すると、興味深いことに 3 つの言葉に対する感性量は全て同じ順位となる。そこで、これら 4 つの画像のみを使って、

それぞれエントロピーの計算値と言葉による感性量の相関係数、および、言葉による感性量同士の相関係数の比較を表 5.5 に示した。

言葉による表現同士の比較を見てみると、「拡散の度合い」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」の相互間において全て約 1 という相関係数を得た。ここで、論理的に考えることを要求される「捕まえにくさ」による感性量に対しても「拡散の度合い」および「無秩序さ」がそれぞれ約 1 の相関係数となったことは興味深い。このことから、ここでは、これら 3 つの言葉による共通な感性によって、画像 E,F,G および H の 4 つの画像が順序づけられた可能性が高い。そして、この感性こそが、純粋で本質的なエントロピー変化に反応する感性ではないかと考える。そこで、この 4 つの画像を使って、感性量と相関性のあるエントロピー計算方法について再検討した。

#### 5. 3. 4. 4 感性量に基づく 2 値画像のエントロピー値計算方法に関する考察

表 5.5 のエントロピーの計算方法と各言葉による感性量との相関係数の比較に着目すると、計算方法(b)と(c)については全てマイナスの相関係数となった。これに関する 1 つの理由としては、計算方法(b)については、分解能不足、即ち、画像 F~I は白と黒の画素が切り替わる周波数が高いため、シンボル当たりの面積が大きい (2×2 ドット) 計算方法(b)では能力不足となった可能性がある。

また、計算方法(b)と(c)については、シンボルの多様性を計るアルゴリズムであるが、計算方法(c)に着目すると、この計算は、列および行方向への 1 次元的な連なり長さの多様性を計るアルゴリズムである。画像 F と G を比較した場合、画像 F は大きな黒い画素の塊が 1 つあるが、画像 G ではより小さい塊の 2 つに分割されている。連なり長さの多様性の観点で見た場合、画像 F の方が、画像 G よりも長い連なりがあるため、F は短い画素から長い画素まで多くの種類の長さを持つことになり、エントロピー値は高くなると考える。しかし、これらの 2 つの画像をあくまでも著者の主観で比較すると、画像 F の方が「まとまっている」という感性が働き、画像 G よりも多様性 (乱雑さ、無秩序さ) は感じられない。この矛盾について考えてみると、計算方法(b)および(c)によって計算される多様性は、あくまでも画像情報データ、即ち、画像データを 1 列に並べたものによるシンボルの多様性であり、人間がその画像から感じる、平面的な広がりに対する多様性とは異なるからではないかと考える。この仮定に従えば、画像の 1 次元的なシン

ボルの多様性を計る画像情報エントロピー値は人間の感性によるエントロピーとは相関性が少ないと考えることができる。

次に、計算方法(b)および(c)を除く(a),(d)および(e)に着目すると、表 5.4 に比べて表 5.5 では、相関係数が全て上昇している。画像 A～E を含む全ての比較を行った表 5.4 では、計算方法(a),(d)および(e)は、容量依存エントロピーを表す「拡散の度合い」に対する相関係数がそれぞれ 0.92, 0.82 および 0.95 と高い値となっているが、強度依存エントロピーを表す「無秩序さ」に対しては、それぞれ 0.41, 0.05 および 0.30 という低い相関係数となっている。しかし、表 5.5 の比較においては、計算方法(a),(d)および(e)のいずれも「無秩序さ」に対する相関係数が 0.9 以上の相関係数となった。

以上のことから、画像 A～E を一種の攪乱因子と考えると、これらが除かれた表 5.5 の比較において、計算方法(a), (d)および(e)が言葉による感性量と相関係数が高くなったことは、これらの計算方法が、2 値画像から感じる純粹で本質的なエントロピーをある程度の正確性を持って計算できているからだと考えることができる。特に、計算方法(e)については、相関係数がそれぞれ「拡散の度合い」に対して 1, 「無秩序さ」に対しては 0.97, 更には論理的な思考が必要であると考えられる「捕まえにくさ」に対しても相関係数が約 0.99 となり、全てにおいて完全相関に近い相関係数が得られた。この結果は、計算方法(e)が、画素間の長さを基準にしているため、前述した、1 次元的な情報エントロピーを算出する計算方法(b)および(c)とは異なり、2 次元的な広がりを数値化できるからではないかと考える。このことから、2 値画像を見た被験者が感じる本質的なエントロピーを計測する方法としては、今回考案した、2 つの画素間の距離を基準とした計算方法(e)が比較的に適していると考えることができる。

これに関しては、第 2 章 (2.3.4) において、容量依存エントロピーと強度依存エントロピーを区別することなく説明する方法として、式(2.3.42)で導かれる距離の概念を用いると分かりやすいことを述べた。このことと、本章で得た 2 値画像において、本質的なエントロピーを測る尺度として画素間の距離が使える可能性は、エントロピーの本質を考える上で、重要な関係があると考えられるが、これに関する詳細な検証は、今後の検討課題とする。

#### 5. 4 第5章のまとめ

白黒 2 値による数種類の画像を被験者に見せて、これらの画像のエントロピー

値と「拡散の度合い」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」の言葉による表現から得られる感性量との間の相関性を調べる心理実験を行った。そこで比較される2値画像のエントロピー値は、それぞれ異なる数種類のアルゴリズムによる算出方法によって求め、人間が感ずるエントロピーに適した2値画像のエントロピー算出方法についても検討した。その結果以下のような知見を得た。

(1) エントロピーの論理的な概念によって恣意的に用意した2値画像を排除し、自然界に存在し得る自然な画像パターンによってそれぞれ「拡散の度合い」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」の言葉によって感じる感性量を比較したところ、これら3つの言葉の間の相関性は非常に高かった。このことから、このような、自然性のある配列による2値画像の比較に働いた感性は、本質的なエントロピーに基づいたものである可能性が高いと考えられる。

このことより、エントロピーの本質を理解するということは、これらの画像や、言語表現が共通に持つ概念を理解することに他ならず、したがって、エントロピーの本質的な意味を理解するためには、これらの表現についてそれぞれの表現が表現することができる事象を全て感じることで得られるのではないかと考える。

(2) (1)で選定された画像で比較した結果、これまで、情報量の指標に用いられてきた、画像情報エントロピー計算方法によるエントロピー値は、人間がその画像の平面的な多様性から感じるエントロピーとは異なるものである可能性がある。また、2値画像を見た被験者が感じる本質的なエントロピーを計測する方法としては、2つの画素間の距離を基準とした計算方法が比較的に適している。



## 第 6 章

# 熱工学教育における エントロピー概念の説明方法の検討

## 6. 1 はじめに

前章まででは、「エントロピーの本質的な意味」を探りながら、そのエントロピーの本質を視覚による感性も交えながら、どのような言語表現で表現すべきかということについて議論してきた。これらの研究の最終的な目標としては、エントロピーの本質を明らかにすると共に、そこで得た知見を、熱工学分野における教育、即ち、熱力学の授業や教科書、あるいは啓蒙書等でエントロピーの啓蒙に活用することである。そこで、本研究では、未だ完全ではないながら、前章までに明らかとなった部分までを使って、エントロピーの視覚的な感性量と言語表現による心理量の関係を基に、学習者に、マルチメディアコンテンツとエントロピーの言語表現を使いながらエントロピーの概念を理解させるのに効果的に説明する手法についての検討を試みた。

一方で、学習者に熱力学的なエントロピーの概念を説明する時には、そもそも熱とは何か、ということから理解させなければ、その概念の本質を理解させることは難しいと考える。そこで本章では、はじめに、学習者に熱の本質を的確に理解させる方法を検討することからはじめて、その上で最終的にエントロピーの概念を理解させる手法を検討した。そして、検討した内容を、神奈川工科大学大学院機械工学専攻における「熱力学特論」において授業実践を行い、簡単な評価も行った。

## 6. 2 分子運動論における熱の本質の表現方法の検討

分子運動論など、目で直接見ることができないミクロ的な現象については、教科書に書かれている挿絵などの概念説明だけでは即時に理解することは難しく、周辺の理論の学習や演習などを通して、時間をかけて理解できるようになる場合が多い。こうした試行錯誤による思考の過程は、基本的な概念の理解に不可欠であると考えるが、マルチメディア等のコンテンツを用いることで、理解の促進と学習時間の短縮をもたらすと考えた。そこで、ここでは、熱力学をミクロの視点から議論する分子運動論の内容に着目した。

分子運動をコンピューターシミュレーションなどで再現して学習させる手法は、以前から既に多く試みられている<sup>96)~99)</sup>。これらは、分子動力学に基づいた計算によって忠実に再現されたコンテンツが多い。また、学生や生徒に直接プログラミングを課すことで、より高い学習効果を得ている報告もある<sup>100)</sup>。これらは、高い学習効果をもたらすが、同時に多くの学習時間を必要とする。前述のように、

本研究の目的は、比較的短い時間で効果的に基本概念を学ばせることを目的としている。したがって、分子運動を、理論に忠実に再現するコンテンツよりも、概念の本質の表現に的を絞った単純なコンテンツの方がより短時間に、感覚的に理解させることができると考えた。そこで、簡単な動きによって、気体の分子の運動および構造を再現する、それぞれ趣旨の異なる3種類のCGアニメーションコンテンツを作成した。これらは、分子の直線運動を再現したもの、熱振動の動きと分子の回転運動を再現したもの、および分子の立体的な構造を立体視によって再現するものである。本コンテンツを神奈川工科大学大学院工学研究科機械工学専攻の講義科目「熱力学特論」において実践し、その教育効果を確認した。

### 6.2.1 分子の直線運動を再現したアニメーションコンテンツの概要

分子の直線運動を再現したCGアニメーションコンテンツを図6.1に示した。このアニメーションは容器を意味する図中の左右2つの四角い枠内に、複数の単原子の分子がランダムに飛び交う気体の分子運動の様子を再現できる。左右の枠は、大きさ、即ち体積を変更したり、それぞれの分子の速度、即ち内部エネルギーおよび温度を変更したりして比較することができる。このアニメーションの左右の分子の状態を比較することで、温度の違いや圧力の違いを説明することができる。但し、ここでは初歩的な熱の概念を表現するに留め、例えば分子間力、分子同士の衝突の影響および分子の速度分布については再現していない。

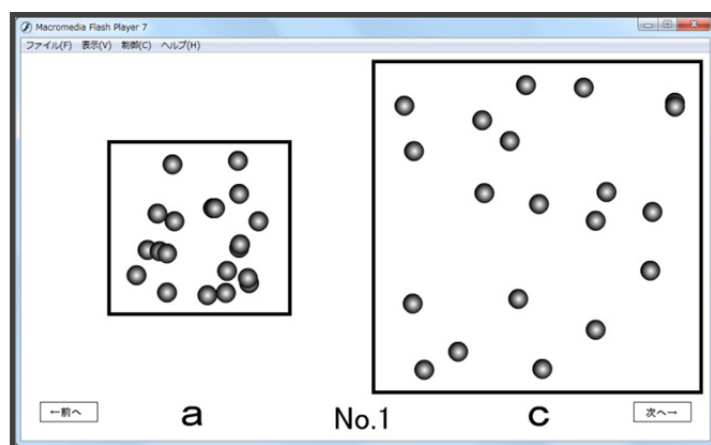


図 6.1 単原子分子の直線運動比較アニメーション

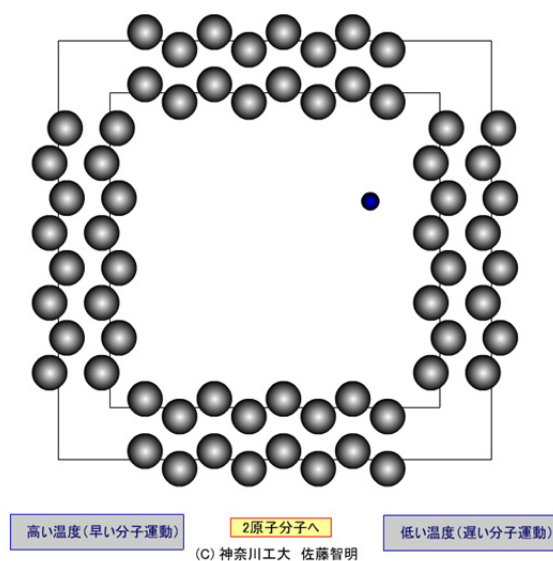


図 6.2 熱振動および 1 原子分子気体アニメーション

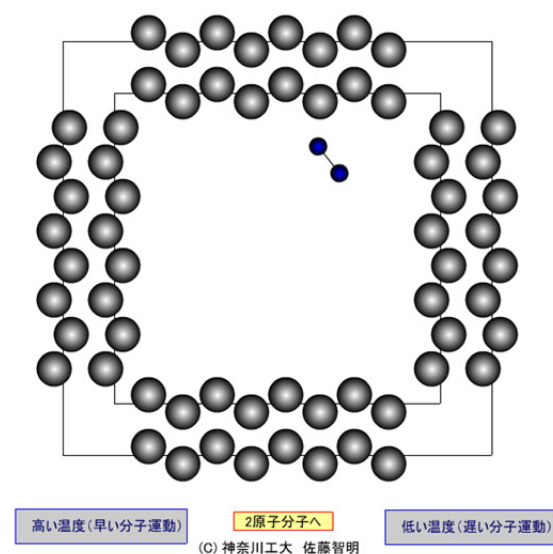


図 6.3 熱振動および 2 原子分子気体アニメーション

## 6. 2. 2 熱振動の動きの概念を表現したアニメーションコンテンツの概要

熱の本質である熱振動あるいは熱運動について，固体の原子における熱振動と気体分子の熱運動を表現した CG アニメーションコンテンツを図 6.2 および図 6.3 に示した．これらの図は容器を意味する四角形の枠の中に，分子 1 個が飛び回っているアニメーションである．容器の各壁は，固体壁面を原子レベルまで拡大した状態を表現しており，それぞれの原子が熱振動するところをアニメーションに

よって再現している。下部に設置した「高い温度」と「低い温度」のボタンを押すと、原子の振動が、高温と低温のそれぞれの温度状態に対応した激しさになるようになっている。図 6.2 および図 6.3 の各箱の中には、壁に跳ね返って等速度で運動する分子が再現されている。図 6.2 は容器の中を単原子の気体分子が運動している様子を再現しており、図 6.3 は 2 原子の気体分子が回転しながら運動している様子を再現している。この 2 つのアニメーションは、内部エネルギーとして気体分子に蓄えられるエネルギーが、単原子では単純に分子が飛び交う直線運動エネルギーとして、他方、2 原子分子では、直線運動と共に 2 つの原子によって生じる回転運動エネルギーとしても蓄えられるということを概念的に説明することができる。図 6.1 のコンテンツと同様に、分子の運動は、あくまでも概念表現だけに留め、分子間力や分子内の原子の振動等の詳細な運動は省略し単純化している。図 6.1, 図 6.2 および図 6.3 のコンテンツの作成には、2 次元 CG アニメーション作成アプリケーションの Flash MX (Macromedia 製) を用いた。

### 6. 2. 3 エネルギーの等分配法則を説明する立体視コンテンツの概要

エネルギーの等分配法則は、一般的な教科書では、図 6.4 のような挿絵を用いて説明する。即ち、1 原子分子（単原子）では、分子の運動は、 $x$ ,  $y$  および  $z$  の直進方向のみの 3 自由度を持つこと（図 6.4(1)）。また、2 原子分子ではこれらの直進運動に加え、 $y$  軸および  $z$  軸を中心とした回転運動、 $y_\phi$  および  $z_\phi$  が存在し、全部で 5 つの自由度を持つこと（図 6.4(2)）。更に、3 原子以上の分子ではこれらに  $x$  軸を中心とした回転運動  $x_\phi$  が加わり、全部で 6 つの自由度を持つこと（図

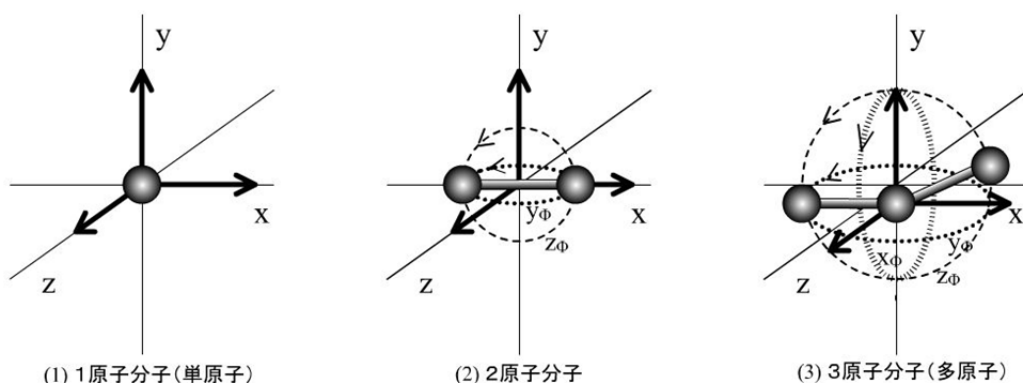


図 6.4 教科書の挿絵や板書による分子の自由度の概念図

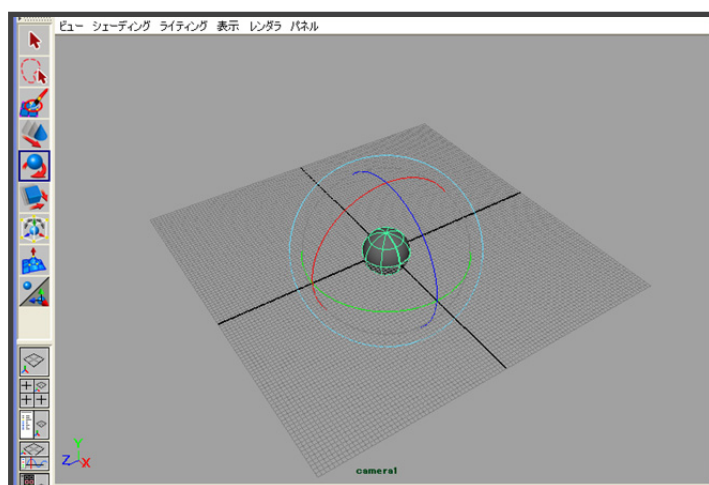


図 6.5 1 原子分子(単原子)立体視コンテンツ

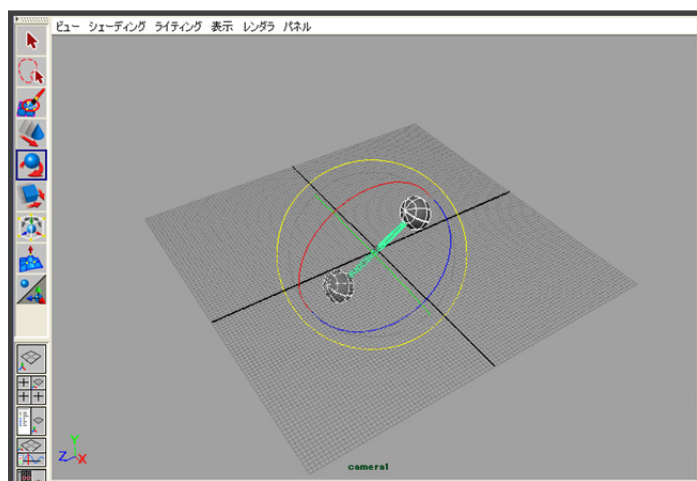


図 6.6 2 原子分子立体視コンテンツ

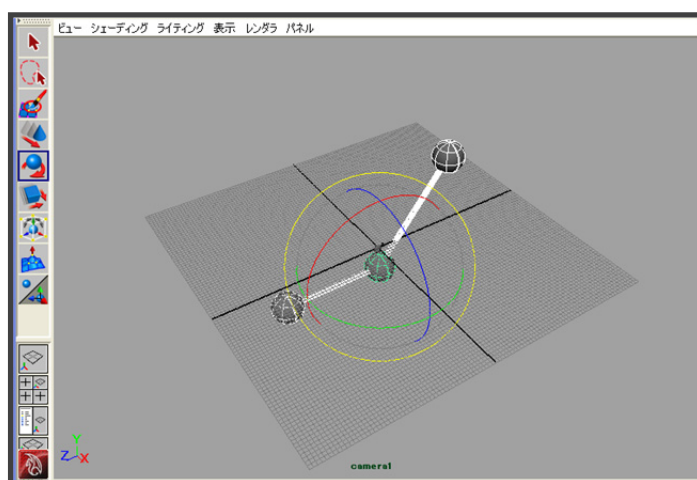


図 6.7 3 原子分子(多原子)立体視コンテンツ

6.4(3)). そして、これらの自由度に対応したそれぞれの運動にエネルギーが均等に蓄えられるため、分子が持つ自由度の数によって比熱が異なることを説明することが一般的な解説である。しかし、図 6.4 のような 2 次元図では、回転方向の動きが分かりづらく、また、図 6.4(3)のように多原子分子の重心の移動なども加えると、非常に見にくい図となる。特に、板書においては細い線のみで描くため、立体的な概念を伝えることは更に難しくなると考える。そこで、本研究では、これらの見にくさを解決するために、実際に分子を各自由度に合わせて、リアルタイムで説明しながら自由に動かすことができ、更に偏光メガネをかけて見ることで立体視可能な CG アニメーションを作成した。図 6.5～図 6.7 にその概要を示した。分子の動作は分子の周りにある画面上のマニピュレーターをマウスで直接操作することで、分子に直線移動や回転移動などをさせることができる。図 6.5 の単原子分子は  $x$ ,  $y$  および  $z$  の 3 つの直進移動に加えて、 $x_\phi$ ,  $y_\phi$  および  $z_\phi$  の回転運動も操作可能である。しかし、実際に回転させた時の見かけ上は、球形の原子が回るだけなので、原子の直径が非常に小さいとすれば慣性モーメントは無視できる。このため、自由度としては、 $x$ ,  $y$  および  $z$  の直線運動の 3 つの自由度しかないことを説明することができる。次に、図 6.6 の 2 原子分子は上述と同様に回転させると、今度は分子間に距離があるため、回転することがはっきりと見て分かる。したがって、長さ分の慣性モーメントが存在することを理解しやすいと考える。これによって、 $x$ ,  $y$  および  $z$  の直線運動に  $y_\phi$  および  $z_\phi$  の 2 つの軸の回転運動を加えた 5 つの自由度があることを説明することができる。更に、図 6.7 の 3 原子以上の多原子分子については 2 原子の場合と同様の説明によって、更に  $x_\phi$  を加えた 3 つの回転運動の自由度を持つ全部で 6 つの自由度があることを説明できる。

コンテンツ作成ツールとしては、3DCG アニメーション作成ソフトの Maya (Autodesk 製) を用いた。本コンテンツは、Maya の編集画面を直接使い、編集機能として備わっているオブジェクトの直線移動と回転移動の機能を利用する。また、本コンテンツは、著者らが既報で開発した 3DCG 立体視システムを採用した<sup>101)</sup>。このシステムは、Maya 編集機能上の 2 つの仮想カメラからの映像を 2 つのプロジェクターから独立してシルバースクリーン投影し、偏光メガネを通して見ることで立体視を実現できる。これによって、奥行きを感じるバーチャルリアリティ分子運動アニメーションコンテンツとして、その構造を理解し易くなっている。

## 6. 2. 4 講義内容とコンテンツの実践

### 6. 2. 4. 1 講義の概要

上述した分子運動のコンテンツを神奈川工科大学大学院工学研究科機械工学専攻の講義科目「熱力学特論」で実践した。本科目は、機械工学専攻修士課程のカリキュラム上、工学・工業分野において、その根幹的な役割を担う基礎知識の学習を目的とした専門基礎科目群の1つとなっている。本大学院の学生は、工学部の授業において、熱力学の諸法則を、機械の設計などにおいて実用的に運用することを目的として、マクロ熱力学的視点からのみ学習してきており、ミクロな視点、即ち統計力学的な観点からの熱力学については学習していない。カリキュラム目的の1つである、修士エンジニアとしての「根幹的な役割を担う基礎知識の習得」のためには、熱力学的諸性質をより本質的に理解することが重要であると考えられる。そこで、ここでは学部の授業で学習してきた熱力学をよりミクロな視点から統計力学的に論じ直すことで、熱の諸現象を本質的に理解することを目指している。このため、本科目の内容は、統計力学の内容を含み、これらの項目に関しては、理学部などにおける学部レベルの内容となっている。特に、後述するアンケートの結果から、11名中3名が本講義を受講するまで、熱がミクロな分子や原子の運動の総体であることを知らなかったと答えている。このように、本研究科の学生の中には、学部レベルの基礎的な内容を習得できていない者もいるため、こうした学生に対する、概念の理解向上にもアニメーションコンテンツを用いた教育は有効であると考ええる。



図 6.8 偏光メガネ立体視による授業風景



#### 6. 2. 4. 2 コンテンツの実践

前項で述べたコンテンツを本講義で実践した．ここでは特に，物質固有の比熱を決める基本原理となるエネルギー等分配法則について説明する項目で用いた実践例を紹介する．

はじめに，前述のように，熱が分子の運動である事を知らない学生もいた．そこで，図 6.1 の分子の直線運動のアニメーションを使い，左右の 2 つの容器でそれぞれ温度や体積が異なる状態を様々作り出し，比較の上で，分子の運動から見た体積と温度と圧力の関係について説明した．更に，図 6.2 および図 6.3 のアニメーションを用いて，容器の固体壁の原子列の熱振動と，内部の気体分子の運動の関係を説明した．

次に，図 6.2 の単原子分子のアニメーションでは分子の直線運動しか存在しないこと．図 6.3 の 2 原子分子のアニメーションでは，分子が回転しながら移動していることを説明した．そして，これら 2 つのアニメーションの比較によって，2 原子以上の分子では回転モーメントに蓄えられるエネルギーがあることを説明した．次に，図 6.5～図 6.7 のコンテンツを使用する前に，図 6.4 に示したような，一般的な教科書に記されている挿絵と同様な板書をして分子の自由度に関する概要を説明した．その後，図 6.8 に示したように，受講者に偏光メガネをかけさせて図 6.5～図 6.7 のコンテンツを実践した．前節で説明したように，それぞれ，単原子，2 原子および 3 原子（多原子）の分子をマウス操作で動作させ，各自由度について説明した．そして，与えられたエネルギーが各自由度に等しく分配されて蓄えられるため，自由度の数が多くなればなるほど分子 1 個あたりに蓄えられるエネルギー容量が増えること．そして，そのため自由度が大きいほど単位温度上昇させるためのエネルギーが大きくなり，比熱が大きくなることを，次節の式(6.2.1)～(6.2.6)を誘導しながら説明した．参考までに，この項目の説明内容の詳細を次に示した．

#### 6. 2. 4. 3 エネルギー等分配法則の説明内容

分子が移動する速度の平均値を  $v$  として， $x$ ,  $y$  および  $z$  軸方向の各成分の平均速度を  $v_x$ ,  $v_y$  および  $v_z$  とすると，式(6.2.1)が得られ，これを式(6.2.2)の分子 1 個の運動エネルギーの式に代入すると，式(6.3.3)が得られる．

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (6.2.1)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T \quad (6.2.2)$$

$$\frac{3}{2}k_B T = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + \frac{1}{2}mv_z^2 \quad (6.2.3)$$

ここで、第2章で既出のように、 $m$ は分子の質量、 $k_B$ はボルツマン定数、 $T$ は温度である。この式を使って、エネルギーが  $x, y$  および  $z$  の速度成分(各自由度)に等しく分配されることを説明した。このことから、1 自由度当たりのエネルギーは  $k_B T/2$  となるが、これは図 6.5 の  $x, y$  および  $z$  の直進運動の成分だけではなく、図 6.6 および図 6.7 の  $x_\phi, y_\phi$  および  $z_\phi$  の回転運動成分にも平等に分配されることをコンテンツを見せながら説明した。そして、分子 1 個あたりのエネルギー  $E_1$  は  $f$  を自由度とすると次式(6.2.4)となることを説明した。ここで、 $R_0$  は一般ガス定数、 $N_A$  はアボガドロ数である。

$$E_1 = \frac{f}{2} k_B T = \frac{f}{2} \frac{R_0}{N_A} T \quad (6.2.4)$$

これより、定積モル比熱  $c_v$  および定圧モル比熱  $c_p$  は、

$$c_v = \frac{\Delta E_1 N_A}{\Delta T} = \frac{f}{2} R_0 \quad (6.2.5)$$

$$c_p = R_0 + c_v = \frac{2+f}{2} R_0 \quad (6.2.6)$$

となり、これによって分子の比熱が概算できることを説明した。

### 6. 2. 5 アンケートによる評価および考察

授業後アンケート調査を行い、本コンテンツの評価を行った。アンケートの形式は、各項目に対して 0～4 までの 5 段階の評定尺度法を採用した。それぞれ、0：全くない、1：あまりない、2：普通、3：やや強く、4：大変強く、の 5 段階である。アンケート結果を表 6.1 に示す。

設問(1)の結果より、11 名中 3 名が、熱が原子や分子のミクロな運動であることを知らなかった。このことは、非常に基礎的で根本的な概念を知らなくても、進級、進学できてしまう現状の教育システムの問題点を浮き彫りにしたともいえる。即ち、物理現象の本質を知らなくても、計算問題さえできてしまえば試験に合格してしまうため、こうした学生が見過ごされてきた可能性がある。このことは、今後、大学院においてもリメディアル教育が必要になってきたことを暗示し、決して見過ごすことはできないが、本論文の目的からはそれるので、今後の議論とする。

一方で、この設問(1)の熱の本質を知らなかった 3 名の内、1 名は設問(2)の板書と口頭による説明で大変よく分かったとする、4 を選び、2 名は設問(3)の分子運動のアニメーションで大変よく分かったとする、4 を選んだ。これにより、基礎力の十分でない受講者でも、本アニメーションは十分機能したといえる。

次に、各評定尺度値による検討を行う。設問(2)の板書と口頭説明による理解は、評定尺度値は平均値 2.8 と比較的良い結果を示したが、さらに、設問(3)の 2D アニメーションの効果については非常に高い尺度値 3.3 の尺度値を示した。このことから、図 6.1、図 6.2 および図 6.3 の 2D アニメーションコンテンツは熱の分子運動の説明の補助に非常に効果的だったといえる。

表 6.1 アンケート結果

質問内容	0	1	2	3	4	評定尺度値
(1)熱が分子の振動や運動であることを既に知っていた	3	0	0	6	2	2.4
(2)熱と分子運動の関係に関する黒板の板書と口頭説明で十分理解できた	0	0	4	5	2	2.8
(3)熱振動と分子運動の2Dアニメーションは分かりやすかったと思う	0	0	2	4	5	3.3
(4)分子運動の自由度(単原子, 2原子および多原子)について既に知っていた	3	5	2	0	1	1.2
(5)分子運動の自由度に関する黒板の板書と口頭説明で十分理解できた	0	0	6	3	2	2.6
(6)分子運動の自由度に関する3D立体視アニメーションは分かりやすかったと思う	0	0	2	2	7	3.5

次に設問(4)の分子運動の自由度については、設問(1)と同様に、3名が全く知らなかったと答えた。この内、1名が設問(5)の板書と口頭説明で非常によくわかったとする、4を選んだ。その他の2名は、設問(6)の3D立体視アニメーションを見て、非常にわかりやすかったとする、4を選んだ。評価尺度値による評価では、設問(5)の板書と口頭による説明でも評価尺度値2.6と高い尺度値を示しているが、設問(6)の3D立体視アニメーションについては評価尺度値3.5という非常に高い値となった。このことから、図6.5～図6.7の立体視アニメーションコンテンツは分子運動の自由度、およびエネルギー等配分法則の説明に効果的だったといえる。

### 6. 3 分子運動論におけるエントロピー概念の表現方法に関する検討

#### 6. 3. 1 熱力学的エントロピー値の算出式と言語表現の関係についての考察

熱工学分野における教科書の中や、実際の授業においては、熱力学的エントロピー概念の説明は、マクロ的な視点による、クラウジウスのエントロピーの定義式からの誘導による方法が主となる。前章までに検討してきたように、エントロピーの一般的な表現の中には、「乱雑さ」、「拡散の度合い」、「曖昧さ」あるいは「捕らえどころのなさ」のような言葉による表現があるが、こうした言葉による概念と、熱力学的な状態量としての温度、体積や圧力をミクロな現象を扱う統計力学的な手法を用いずに、直接結びつけて説明することは難しい。統計力学は物理学において非常に重要であるが、熱工学分野の教科書で扱われることは少ない。

そこで、本研究では、いくつかの言語表現について、それらの意味するものが、クラウジウスの定義から導かれる誘導式とどのような関係にあるのかを、統計力学的な手法は用いずに説明する手法を検討した。これに関しては、第2章で展開した説明内容も含まれる。更に、第4章で検討した、分子の運動を再現するアニメーションから得るイメージを使って、これらの関係を説明する手法についても検討した。

#### 6. 3. 2 クラウジウスの定義からの誘導式による解説

クラウジウスによるエントロピーの定義式は第2章で既出の次式[既2.3.13]である。この式から、第2章でも記したように、理想気体の状態式  $PV = nRT$ 、および  $nR = Nk$  の関係から誘導して式(6.3.2)および式(6.3.3)（単原子分子の場合）が得られる。

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (6.3.1) \text{ [既 2.3.13]}$$

$$\Delta S = nc_v \ln\left(\frac{T_h}{T_l}\right) + nR \ln\left(\frac{V_h}{V_l}\right) \quad (6.3.2)$$

$$\Delta S = \frac{3}{2} Nk \ln\left(\frac{T_h}{T_l}\right) + Nk \ln\left(\frac{V_h}{V_l}\right) \quad (6.3.3)$$

ただし、 $\Delta S$  比較する 2 つの状態間のエントロピーの差、 $P$ : 圧力、 $V$ : 体積、 $T$ : 温度、 $Q$ : 熱量、 $c_v$ : 定積比熱、 $n$ : モル数、 $R$ : 気体定数、 $N$ : 分子数および  $k$ : ボルツマン定数である。更に、添え字の  $h$  は高いエントロピー状態の時、 $l$  は低いエントロピー状態の時を示している。第 2 章でも述べたように、式(6.3.3)より、エントロピーは温度  $T$  に依存する要素と体積  $V$  に依存する要素を持っていることが分かる。

これまでの熱力学の教科書等では、一般的に、式(6.3.3)までの誘導しか示されていない。工学的には、温度や圧力および体積といった物質の状態量が重要なので、温度、体積あるいは圧力とエントロピーの関係が分かれば十分である。しかし、本研究では、エントロピー概念の理解のために、言語表現によって生起される感性を利用することを目的としているので、分子運動と言語表現の関係を分子の運動レベルで論理的に示す必要がある。このため、本研究で実践した講義においては、第 2 章でも記した、以下の誘導を行った。

分子運動論における誘導によって、温度  $T$  と分子の速度  $v$  との関係は、 $m$ : 質量も加えて、次式となる。

$$T = \frac{m}{3k} v^2 \quad (6.3.4)$$

これを式(6.3.3)の右辺第 1 項に代入し、第 2 項で  $V=L^3$  とすると次式が得られる。

$$\Delta S = 3Nk \ln \left( \frac{v_h}{v_l} \right) + 3Nk \ln \left( \frac{L_h}{L_l} \right) \quad (6.3.5)$$

あるいは,

$$\Delta S = 3Nk \ln \left( \frac{v_h}{v_l} \cdot \frac{L_h}{L_l} \right) \quad (6.3.6)$$

式(6.3.5)および(6.3.6)より, エントロピーは分子の速度  $v$  (ここでは平均速度であり, マクスウェルの速度分布に関係しない) に依存する要素と分子間の距離  $L$  に依存する要素を持っていることが分かる. 本研究では, この平均速度および分子間距離 (面積と相関) と言語表現との関係を以下のように考察し, この考え方を授業で解説することにした.

### 6. 3. 3 適切な言語表現の検討

学生に対して, 第4章において得られた知見について次のように説明した. 即ち, 温度および面積の異なる2種類の分子運動アニメーションを被験者に見せて, 「乱雑さ」, 「拡散の度合い」および「捕まえにくさ」等の言語表現による感じ方がより大きい方を選ばせる一対比較法による心理実験を行った. その結果, 「乱雑さ」や「無秩序さ」等の表現に関しては, 温度が高くなり, 分子の速度が速くなるとより強く感じるが, 同じくエントロピーが上昇する面積が増加したときは, 強くなったとは感じないことが分かった. このことから, 「乱雑さ」や「無秩序さ」等は, エントロピーの概念の中で, 主に式(6.3.5)右辺第1項の速度  $v$  の違いを感覚的に表現していると考えられる. 次に, 「拡散の度合い」, 「ぼやけた感じの度合い」や「曖昧さ」の表現に対しては, 面積が増加すると大きくなったと感じるが, 温度が上昇, 即ち分子の速度が速くなっても, 大きくなったとは感じていない事が分かった. これより, 「拡散の度合い」, 「ぼやけた感じの度合い」や「曖昧さ」等は, 主に式(6.3.5)右辺第2項の分子間の距離  $L$  の違いを感覚的に表現していると考えられる.

一方で, エントロピーは, 本来物質の状態を示す状態量であり, 速度の変化および距離の変化のどちらに対しても同様に表現できる言語表現が見つかる可能性

もある。そして、その表現が、エントロピー概念を適切に表現できる言葉であるとする。第2章および4章でも議論したように、その候補として、「捕まえにくさ」あるいは「捕えどころのなさ」を考えた。論理的に考えると、分子の速度が速くなれば、その分子を捕まえにくくなり、分子間の距離が長くなればなるほど、広範囲に広がってしまうことになるため、やはり捕まえにくくなるとイメージすることができると考えた。この表現を使えば、式(6.3.5)の右辺第1項の分子の速度と第2項の分子間の距離のどちらの変数に対しても感性感は正の相関を示すと考えられる。

本授業では、その根拠づくりを兼ねて、受講者に捕まえにくさを体験的に理解してもらうために、実際に動き回る分子を捕まえるゲーム感覚のアニメーションコンテンツを作成して実践した。

#### 6.3.4 エントロピーを比較するCGアニメーション

前項6.3.2で議論した、分子の速度および分子間の距離とエントロピーの関係を、受講生が視覚による感性的な補助を受けながら理論的に理解してもらうことを目的として、説明時にエントロピーの概念を表現する言語表現と一緒に用いる2種類のアニメーションを作成した。1つ目を図6.9～6.11に示した。これは、第4章で用いたエントロピーの1対比較実験で用いたものを改造したものである。左右2つの四角の領域をそれぞれ容器と見立てて、左右の分子の速度（温度）および分子が飛び回る領域（面積）が異なるパターンの1対比較を行わせることができる。左右の分子の数は同数（20個）で、各分子はランダムな位置に発生し、ランダムな方向に移動する。図6.9は左のaの状態、右のbの状態共に温度（分子速度）は等しいが、面積はbの方が4倍大きいためbの方がエントロピーが高い。図6.10はaとcが面積が等しく、cの方が4倍の温度（分子速度は2倍）を持つためcの方がエントロピーが高い。また、図6.11は、左右のbとcでそれぞれ温度と面積が異なるがエントロピーが等しい状態を再現している。表1に各パターンの状態変数を示した。このアニメーションを使って、それぞれ面積の大小および温度の高低の異なった状態の分子運動を被験者に見せて「乱雑さ」や「拡散の度合い」等の高い方を選ばせて、エントロピーの違いを体感させることを目的とした。

2つめのコンテンツを図6.12に示した。本コンテンツは、「捕まえにくさ」を体感してもらうために作成したゲーム感覚のコンテンツとなっている。図中、左

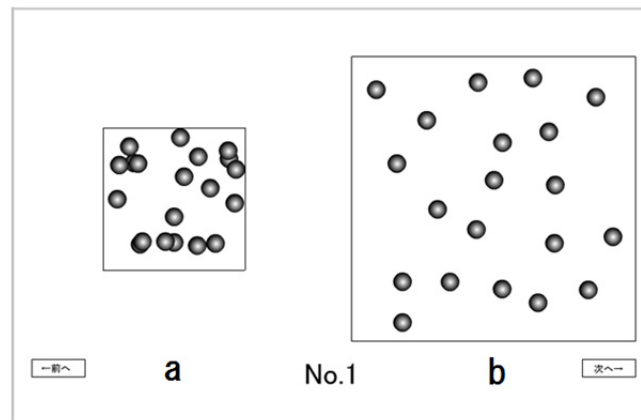


図 6.9 分子運動アニメーションの例  
(右の b の方が，面積が大，温度，分子速度は同じ)

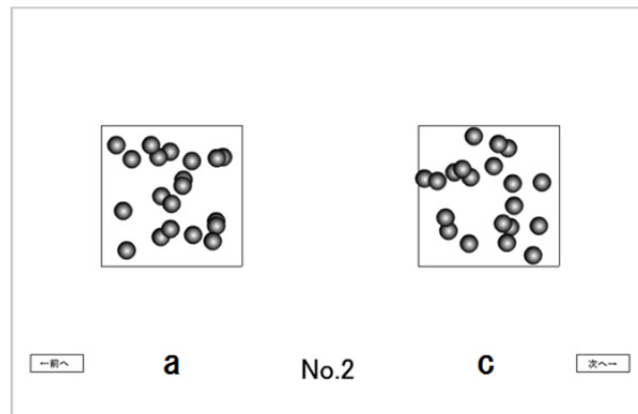


図 6.10 分子運動アニメーションの例  
(右の c の方が，温度高い：分子の速度速い)

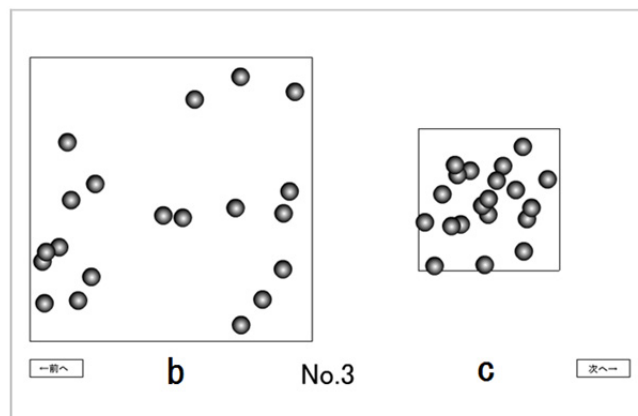


図 6.11 分子運動アニメーションの例  
(b は面積が大，温度低い，c は温度高い，面積が小)



表 6.2 各アニメーションパターンの状態変数

	アニメーションパターン		
	a	b	c
分子速度 $\omega$	1	1	2
温度 $T$	273	273	1092
面積 $A$	1	4	1
エントロピー $S$	1.0	2.4	2.4

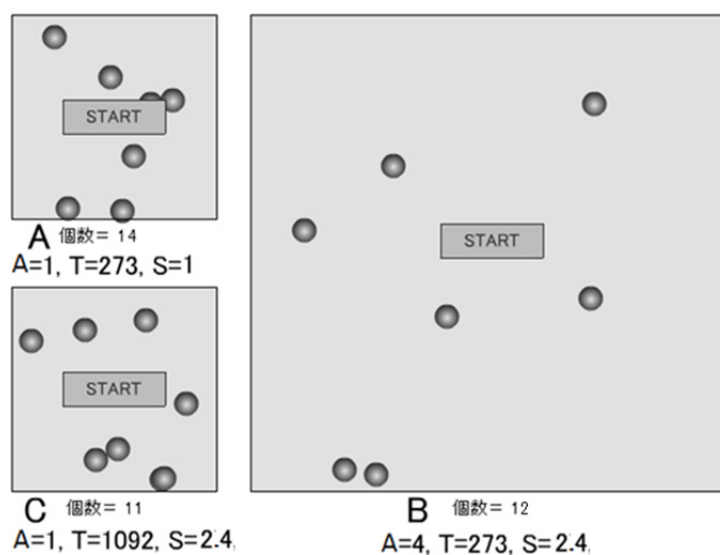


図 6.12 捕まえにくさの実験コンテンツ

側に上下に分かれた 2 つの小さな四角い領域 A, C と, 右側の大きな四角の領域 B の中に, それぞれ同数の分子(7 個)が運動している. これら A, B および C は, 基本的に, 分子の速度や面積は, 前述の一対比較で用いたコンテンツにおける, それぞれ a, b および c と同様となっており, 表 6.2 の変数に基づいて作成されている. A, B および C の各領域の中央にはスタートボタンが設けられている. このボタンをクリックするとランダムな位置から各分子が動き出す. これらの分子をマウスのカーソルで追いかけてクリックすると, その捕まえた個数がカウントされて各領域の下部に表示されるようになっている. 3 つの領域は全て同じ時間だけ分子を追いかけるようになっていて, 3 つの領域を全て終わると, 分子を同じ時間内に何個捕まえることができたかが比較できる (分子の個数はコンテ

ンツ実施時間が長くないように考慮して図 6.9～6.11 の一対比較のコンテンツよりも少なくしてある)。これによって面積あるいは温度の違いに関わらず、エントロピーが上昇すると分子が捕まえにくくなることを体感できると考えた。なお、これら 2 種類のアニメーションコンテンツは、作成ツールに Macromedia 製 Flash-MX を用いた 2D(2 次元)CG アニメーションである。

### 6. 3. 5 講義内容とアニメーションコンテンツ利用方法

#### 6. 3. 5. 1 実践した講義科目

前項の 6.3.1 の理論の説明と、6.3.4 のアニメーションコンテンツによる実験を前節 6.2.4 と同じ神奈川工科大学大学院工学研究科機械工学専攻の講義科目「熱力学特論」で実践した。本講義は、6.2.4 で実践した講義の後半部分にあたる。既述のように、6.2.4 において既に熱の本質に関する学習は既習である。

#### 6. 3. 5. 2 講義内容及びアニメーションコンテンツの利用

エントロピーの概念を説明する講義は、6.2.4 の分子運動の自由度、エネルギーの等分配の法則や分子の速度分布などの分子運動論（統計力学の詳細な内容までは入らない）の理論部分の基礎事項を一通り説明した後に行った。説明内容は、まず、節 6.3.2 で述べた式(6.3.1)から式(6.3.6)の誘導を行った後に、式(6.3.5)、(6.3.6)から得られるエントロピー概念の 2 面性、即ち、エントロピー値は分子の速度および分子間の距離と、それぞれ独立に従属していることを説明した。次に、受講生を被験者として、第 4 章で行ったものと同様の図 6.9～図 6.11 のアニメーションコンテンツを使った心理実験を行った。授業においては、PC 教室を使用して、受講生 1 人 1 台ずつパーソナルコンピュータを使用させて本アニメーションコンテンツを実行させた。それぞれ図 6.9 から図 6.11 のパターンを画面上に表示し、その画面上に再生された左右 2 つのアニメーションの内どちらが次の言葉に対して強く感じるかを選ばせた。比較に用いた言葉は、「乱雑さ」「無秩序さ」「曖昧さ」「拡散の度合い」および「捕まえにくさ」の 5 種類である。結果は各受講生に答案用紙を配り記述させた。更に、答案には、このコンテンツの終了時点において、これら 5 種類の言語表現の内、どの表現が最もエントロピーの概念を示していると思うかの設問も設けて答えさせた。

翌週に行った次の時間において、図 6.9～図 6.11 のアニメーション比較の集計結果と、最適と思う言語表現について答えさせた結果を受講生に示した。表 6.3

表 6.3 等温状態での比較 ( $S_a=1$ ,  $S_b=2.4$ )

図1の比較	エントロピーが $a < b$ の比較(人数)	
	左 $a$	右 $b$
乱雑さ	4	10
無秩序さ	1	13
曖昧さ	0	14
拡散の度合い	0	14
捕まえにくさ	0	14

表 6.4 等積状態での比較 ( $S_a=1$ ,  $S_c=2.4$ )

図2の比較	エントロピーが $a < c$ の比較(人数)	
	左 $a$	右 $c$
乱雑さ	2	12
無秩序さ	3	11
曖昧さ	6	8
拡散の度合い	4	10
捕まえにくさ	0	14

表 6.5 等エントロピー比較 ( $S_b=S_c=2.4$ )

図3の比較	エントロピーが $b=c$ の比較(人数)	
	左 $b$	右 $c$
乱雑さ	6	8
無秩序さ	9	5
曖昧さ	14	0
拡散の度合い	14	0
捕まえにくさ	8	6

～表 6.5 にアニメーションの比較結果と、表 6.6 にエントロピーの概念の表現に適切と思う言語表現の集計結果を示す。6.3.2 項で述べた式(6.3.5)と、表 6.3 から表 6.5 までの実験結果との関係についての考察を授業中に説明した。まず、図 6.9 の温度（分子速度）が等しく面積が異なる比較については、式(6.3.5)において、エントロピーは第 2 項の分子間の距離のみで決まってくることを説明した。そして、表 6.3 の結果、「曖昧さ」「拡散の度合い」および「捕まえにくさ」は 14 人全員がエントロピーの高い b を選んだ。この結果、これらの言語表現は分子間の距離の広がりによるエントロピー増加を表現していると考えられることを説明した。一方で、「乱雑さ」は 4 人がエントロピーの低い a を選んでいることから、分子間の距離の広がりによるエントロピー変化の表現としては必ずしも十分ではないことを説明した。

図 6.10 の、面積（分子間距離）が同じ状態で温度（分子速度）が異なる比較については、式(6.3.5)において、エントロピーは右辺第 1 項の分子の速度のみで決まってくることを説明した。そして、表 6.4 の結果、「乱雑さ」と「無秩序さ」については、それぞれ 12 人と 11 人がエントロピーの高い c を選んだ、このことから、これらの言語表現に関しては、概ね分子の速度の変化によるエントロピー増加を表現していると考えられることを示した。「曖昧さ」と「拡散の度合い」に関しては a と c 選ぶ人数が分かれてしまっているので、分子の速度の変化によるエントロピー変化の表現には向かない可能性があることを説明した。また、「捕まえにくさ」に関しては、14 人全員が c を選んでいることから、分子の速度の変化によるエントロピー変化を表現できているといえることを話した。このことから、「捕まえにくさ」は、分子間の距離の変化（面積変化）と、分子の速度の変化（温度変化）の両方に対して表現できている可能性が高いと考えられる事を説明した。

表 6.5 については、エントロピー値の等しい b と c について、b は a に対して分子間の距離の増加によってエントロピーが増加し、c は a に対して分子の速度の増加によってエントロピーを増加させて、それぞれ同じエントロピー値となっていることを話した。したがって、適切な言語表現による感性で選んだときは、b と c を選ぶ人数が拮抗し、同数になる確率が最も高いことを説明した。表 6.5 の結果、b と c が拮抗しているのは「乱雑さ」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」である。したがって、表 6.3 から表 6.5 までを総合すると「捕まえにくさ」が最もエントロピーの概念を適切に表現できる可能性があることを説明した。

次に、表 6.6 に示した、アニメーションコンテンツ比較終了時点における、エ

表 6.6 エントロピーの表現に最適と思う言語表現

言語表現	乱雑さ	曖昧さ	拡散の度合い	無秩序さ	捕まえにくさ
人数	0	1	4	2	7

表 6.7 捕まえにくさの比較実験（被験者 14 名）

	A S=1	B S=2.4	C S=2.4	正誤	
				A>B	A>C
1	14.6	13.8	9.4	○	○
2	13.8	11.6	9.6	○	○
3	17.2	15.2	13.6	○	○
4	15.6	14.2	11.4	○	○
5	12.6	14.2	10.6	×	○
6	12.8	12.4	8.4	○	○
7	18.4	16.4	12.2	○	○
8	17.6	15.2	12	○	○
9	15.6	13	10.2	○	○
10	16	14.6	11.4	○	○
11	18.6	18.2	13.6	○	○
12	16	15.8	11.8	○	○
13	13.2	12.6	10	○	○
14	8	6.8	2.6	○	○
平均	15	13.9	10.5		

ントロピーの概念の表現に最適と思う言語表現の集計結果についての検討を説明した。表 6.6 より、「捕まえにくさ」がエントロピーの概念を表していると考え、受講生が多く 14 人中 7 人(50%)の受講生が選んだ。しかし、この表現を選んだ受講生に、アニメーションを見て、実際に捕まえにくいと感じた（すなわち、感覚的に判断した）のかどうか問うたところ、7 人全員が式(6.3.5)から論理的に考えた結果で答えていたことが分かった。そこで、全員に、図 6.12 の動き回る分子をマウスを使って捕まえるゲーム形式のアニメーションコンテンツを実行してもらい、本当にエントロピーの高い状態は分子を捕まえにくいのか体感してもらう実験を試みた。受講生にはそれぞれ 5 回ずつコンテンツを実施させて、各自捕まえた個数の平均値を計算してもらい、授業時間中に 14 人全員分の結果を集計し発表した。また、同時に、コンテンツ実践時点で「捕まえにくさ」はエントロピー

表 6.8 「捕まえにくさ」に関するアンケート結果

問.「捕まえにくさ」 はエントロピー変化の表現として適切かどうか？	・AとC(速度の違い: 温度の違い)の比較 におけるエントロピー 変化について表現する言葉として		・AとB(面積の違い: 体積の違い)の比較 におけるエントロピー 変化について表現する言葉として	
	感覚的に	論理的に	感覚的に	論理的に
非常に的確(3点)	11	13	3	6
少し的確(2点)	1	0	7	6
少し不的確(1点)	2	1	2	2
全く不的確(0点)	0	0	2	0
平均値	2.64	2.86	1.79	2.29

変化の表現として適切と思うかどうか，を問うアンケートを行い，その場で回答を得た．表 6.7 に捕まえにくさの実験の結果を示す．これより，各平均獲得個数は，領域 A が 15.0 個で最も多く，領域 B が 13.9 個および領域 C が 10.5 個となった．分散分析（一要因，対応あり）の結果，捕まえた個数の平均値に有意な差が認められた（ $F(2,26)=147.0, p<.01$ ）．また，Bonferroni の方法による多重比較（対応あり）の結果，条件 A，B，および C のすべての組み合わせの間に有意差（いずれも  $p<.01$ ）が認められた．したがって，A に比べてエントロピーの高い B および C は明らかに捕まえにくい，という結果になった．B と C の個数の間に違いが見られるものの（この点に関する検討は後述）概ね捕まえられた個数はエントロピーの高低に依存していると考えられる．

表 6.8 は，「捕まえにくさ」はエントロピーの概念の表現として適切かどうか，実際に分子を捕まえてみて感じた感想を問うたものである．それぞれ，領域 A と領域 C における速度の違い，と領域 A と領域 B の面積の違いについて，感覚的に感じた結果と，理論的に考えた場合について 4 段階の強度を問う評定尺度法を用いた．3 点を最高点とする平均値を比較すると，速度の違いについては，感覚的にも論理的にも非常に高い評価となっている．しかし，面積の違いについては，論理的には概ね高い評価となったが，感覚的にはエントロピーと捕まえにくさの相関性をあまり感じないとする結果となった．この点は，表 6.7 の実験条件では，

理論的に  $B=C$  となるはずが、実際の平均獲得数は  $B>C$  となり、 $B$  は  $C$  ほど捕まえにくくなっている結果が反映されている可能性がある。

この結果について考察すると、コンピューターの画面上で、マウスを使つての実践のため、被験者は画面から離れた地点から斜めに分子の動きを見ていることになる。実際に分子を後ろから追いかけたわけではないのでその差が感じにくかった可能性がある。実際に被験者が分子を追いかける状況、例えば、4～5メートル四方以上の池で魚を追いかけるような実験を行えば、その差を大きく感じられるかもしれないが、より正確な実験については、今後の検討課題とする。

最後に、授業において受講生皆で行った実験と検討から、「捕まえにくさ」についての考察を次のように説明した。「捕まえにくさ」は熱力学的なエントロピー概念の本質を表現する言葉として比較的に優れている。即ち、体積が広がり、分子間の距離が広がってしまうと、それぞれの分子を捕まえるのは難しくなり、温度が上昇して分子速度が速くなれば同様にそれぞれの分子を捕まえるのは難しくなるので、エントロピーの概念の2面性を矛盾なく表現できていると考えられる。「捕まえにくさ」は同じ字を使った「捕えどころのなさ」という「曖昧さ」の意味を含む表現もあるが、この「捕える」という感覚はエントロピーの本質を考える上で非常に重要な感覚である。

### 6. 3. 6 教育効果の検討

講義の最後に、今回授業中に用いた2種類のアニメーションコンテンツがエン

表 6.9 アニメーションを用いた授業の評価

アニメーションの種類	(1) 粒子が動き回るアニメーション(アンケートで左右2つを比較した時のコンテンツ)はエントロピーの理解の助けになったか。(調査12名)	(2) 粒子を捕まえるゲーム(捕まえた数を競うゲーム、捕まえにくさを体感するコンテンツ)はエントロピーの理解の助けになったか。(調査12名)
大変強く(4点)	7	5
やや強く(3点)	4	6
普通(2点)	0	1
あまりない(1点)	1	0
全くない(0点)	0	0
平均値	3.42	3.33

トロピー理解の補助になったと思うかどうかを、4点を最高点とした5段階の評定尺度法で問うアンケート調査を行った。結果を表6.9に示す。この結果、評定尺度値は、図6.9～図6.11の分子の動きを一对比較で比較するアニメーションコンテンツについては3.42、図6.12の分子の捕まえにくさを測定するアニメーションコンテンツについては3.33となり、非常に高い値となった。この結果、分子運動のアニメーションコンテンツを用いてエントロピーの言語表現について検討した本講義は有効であったと考える。

#### 6.4 第6章のまとめ

本章では、実際の熱力学の授業において、前章までに明らかとなった部分までを使って、エントロピーの視覚的な感性量と言語表現による心理量の関係を基に、学習者に、マルチメディアコンテンツとエントロピーの言語表現を使いながらエントロピーの概念を理解させるのに効果的に説明する手法についての実践を試みた。

本授業では、ゲーム感覚のアニメーションを使ったり、本研究で事前に行った感性量を計る実験も行ったりして、あらゆる感覚を使ってエントロピーの大小を比較させる体験をさせた。授業後のアンケートでは、エントロピーに対する理解が深まったとする結果が得られたが、あくまでも、参加者の主観的評価であるので、本当にエントロピーの概念の本質的な理解がされたかどうか、といった検証まではできてはいない。しかし、これについては、例えば温度や圧力であっても、人間が感覚を通してそれらの本質を完全理解しているかどうかといった問題は検証は難しいように、今後の検討課題として続けていくべき難しい課題であると考ええる。一方で、この結果は、様々な経験を通して知ることができるクオリアやアフォーダンスなどの本質的な概念を得とくするプロセスと同様に、エントロピーについても、様々な表現方法を通して、その根底に潜むエントロピーの本質的な意味を理解することができる可能性を示唆したものであることに違いはないと考える。また、エントロピーを理解できたと感じる適切な言語表現を選ばせるアンケートの結果、「捕まえにくさ」が最も評価が高かった。感性量に関する相関分析の結果も良い結果であったので、「捕まえにくさ」は、エントロピーの本質的な意味を論理的にも感性的にも表現できる言語表現として比較的に適しているといえる。



## 第7章

### 今後の展望

## 7. 1 エントロピーと感性量に関する研究の今後

本論文中で論じたように，エントロピーの本質的な意味に関する議論は，物理学者や情報科学者の間で長年議論されてきた難題である．マクスウェルの悪魔に関するパラドックスや熱力学的エントロピーと情報エントロピーの同一性に関する議論は一応解決したとされるが，これによって，エントロピーの本質的な意味が人間によって完全に理解されているかどうかは，まだ疑う余地があるのではないかと考える．

また，本論文では，特にエントロピー値と人間の感性量との相関性について議論してきたが，他者による同様の研究は調べた範囲では存在しない．したがって，これに関する議論は，まだ始まったばかりだといえる．以下に今後と考えられる課題および検討すべき事項をまとめる．

## 7. 2 検討すべき課題

### 7. 2. 1 マクスウェルの速度分布を再現したアニメーションによる実験

第4章における実験では，アニメーションにおいて飛び交う分子の速度は皆等しい．クラウジウスの式からのマクロ熱力学によるアプローチでは，速度分布ではなくて平均速度によってエントロピー値を求めることができるので，初期の実験としては，十分価値のある結果が得られたと考える．しかし，統計力学的なア

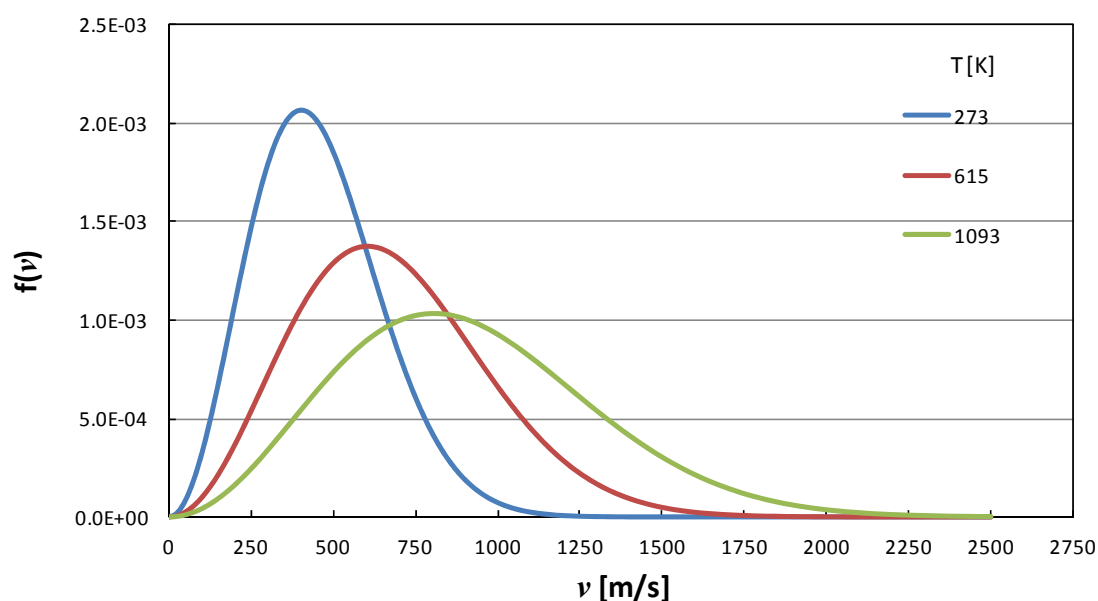


図 7.1 マクスウェルの速さ分布図

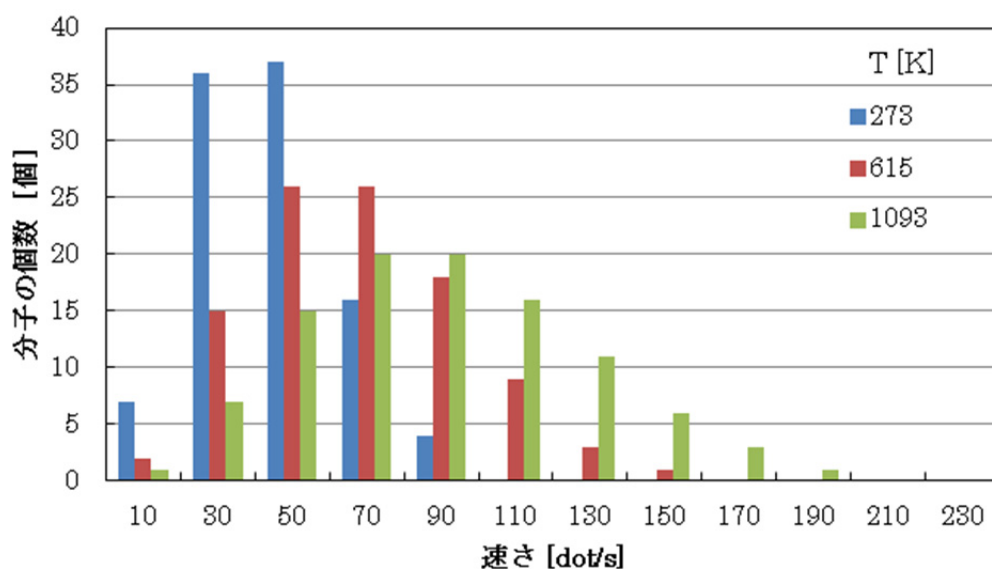


図 7.1 アニメーション中のマクスウェルの速さ分布図

プローチから考えると，分子の速度をマクスウェルの速度分布にしたがったもので実験することも重要であると考え．これに関しては，本論文執筆の現時点において，既に，マクスウェルの速度分布に準拠した分子速度の分布を持つアニメーションによる実験を検討している．

マクスウェルの速度分布から速度ベクトルの概念を除いて，分子の速さ（スピード）のみに着目したマクスウェルの速さ分布がある．第4章で使用したアニメーションにおいて仮に設定した温度 273, 615 および 1093K について算出したマクスウェルの速さ分布を図 7.1 に示した．更に，これを基に設定した実際のアニメーションにおける速さ（1 秒当たり移動ドット数）で示した分子の個数の分布を図 7.2 に示した．

今後，この個数分布による分子運動のアニメーションを開発し，実験を行う予定である．

## 7. 2. 2 人間の知覚心理量とエントロピーに関する議論

心理学の領域でよく知られた定理として，フェヒナー・ウェーバーの法則というのがある<sup>99)~101)</sup>．これは，例えば，10g のおもりを持った手のひらに 1g のおもりを加えたときと，100g のおもりを持った手に同じ 1g のおもりを加えた場合

とで、同じ  $1g$  の感じ方が異なることを示した法則である。これは、人間が重さに対する感覚の分解能を持っているためだとされ、以下の式のように、刺激の絶対値  $\Delta I$  ではなくて、水準値  $I$  に対する比率で感じるからだとされる。

$$\frac{\Delta I}{I} = \text{一定} \quad (7.2.1)$$

ここで、感覚の増分を  $\Delta \phi$  とすると、比例定数  $K$  を用いて以下で表せる。

$$\Delta \phi = K \frac{\Delta I}{I} \quad (7.2.2)$$

更に、微分値で比較すると、

$$d\phi = K \frac{dI}{I} \quad (7.2.3)$$

両辺を積分して、感覚量を求めると、

$$\phi_2 - \phi_1 = \int_1^2 K \frac{dI}{I} = K \ln \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \quad (7.2.4)$$

となる。これは、エントロピーの関係式に類似する。

この関係は、人間が聞く音の強弱に関する量としてのデシベル (dB) や星の等級等、人間の感覚の指標が必要な様々な領域で応用されている。しかし、なぜ人間の感覚が刺激の強さの対数値に比例するのかに関するメカニズムは十分に解明されている訳ではない。本研究では、人間がエントロピーを感じることができるのかどうかに関心を持っているが、フェヒナー・ウェーバーの法則は、人間がエントロピーを感じ取っていることが原因になっている可能性があると考えている。人間の視覚における光の強度を感じるセンサーは網膜細胞であるが、これらの細胞の一つ一つは、光の強さを感じるのではなくて、光が有るかどうかの、0 or 1 の情報しか検出しないとされている<sup>100)</sup>。このことは、強い光を感じるというこ

とが、その強度ではなくて、網膜細胞の何割が光を感じているのか、即ち、確率、あるいはバリエーションを感じているのではないかと考えることができる。例えば、手に注射を打つ場合を考える。通常の注射器による一本の針と、予防接種として行われている BCG ワクチンに使われる剣山のような針とを比較した場合、どちらの痛さの方がいやかを考える。あくまでも著者の主観的な評価として、前者は一点集中で痛みがあるが、後者の方が痛みが分散されて鈍痛となるため、後者のほうが良いと感じる者が多いのではないかと考える。

このように、もし、人間の感覚がエントロピーに基づいて決定されているのだとすれば、本論文で検討しているエントロピーの表現方法も、それによって修正する必要も出てくるかもしれないが、今後、このテーマは、非常に興味のある課題である。

### 7. 2. 3 時間と空間に関する人間の感性とエントロピー

第2章の式(2.3.34)および式(2.3.42)においては、温度が高くなれば、分子の速度が増して、単位時間に移動する距離が長くなることを使って式をまとめたが、逆に速度が増すと、同じ距離を進む時間が短くなると考える事ができるので、以下のようにもまとめられる。ここで  $t$  は単位長さ当たりを移動する時間。

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{3N} = k_B \ln \left( \frac{L/t_2}{L/t_1} \right)^{3N} = k_B \ln \left( \frac{1/t_2}{1/t_1} \right)^{3N} = k_B \ln \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{3N} \quad (7.2.5)$$

$$S_2 - S_1 = k_B \ln \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{3N} + k_B \ln \left( \frac{L_2}{L_1} \right)^{3N} = k_B \ln \left( \frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{L_2}{L_1} \right)^{3N} \quad (7.2.6)$$

このように、エントロピーは時間  $t$  と距離  $L$  に従属する形に書き換えることができる。ここでは、時間  $t$  が短くなればなるほど分子の速度が速くなることを意味しており、速度が速くなれば速くなるほど分子を捕まえにくくなると考えられる。これとは別の時間のとらえ方として、ある状態からある状態へ事象が1ステップ変化する時間が短くなるということは、単位時間当たりの事象の回数は増えるということになる。ここで、事象が1ステップ変化できる時間は可変で一定だ

とすると、その事象の回数に比例して時間が長くなるということになる。このように考えると、式(7.2.6)の  $t_1$  と  $t_2$  の分子と分母を逆にすることができると考える事もでき、時間の増加に伴ってエントロピーが増加することになる。これは、第5章の5.3.4.2でも述べた、インクの拡散や覆水盆に返らず、等の不可逆性の議論では、時間が経過すると共にエントロピーが増大することを意味するが、それと同じ方向性を意味する。このように考えると、時間と空間は区別する必要はなく、同じ次元および同じ方向のものだと考えることもできる。この考えは、かなり飛躍的なものであるが、こうした置き換えは、可能性としては、人間の心の中でも瞬時に行われていることも考えられるので、時間の概念を人間がどのように感じているかを探ることは、非常に興味深いと考える。

例えば、第5章(5.3.4.2)の検討において、図5.6の中の画像AやDのパターン化された画像に対して、論理的な思考が働いた可能性を指摘したが、これとは別に、こうした思考とは異なった他の感性が働いた可能性も否定できないと考える。その1つとして考えられるのが、時間である。熱力学的熱力学的現象のエントロピーの概念においては、エントロピーは体積変化とともに温度変化によって変化するが、温度は分子の速度と関連するため、時間を独立変数とする性質も持つ。また、熱力学第2法則の要であるエントロピーの重要な概念の1つは、事象の不可逆性である。不可逆性を論ずるためにはには時間の概念が不可欠である。したがって、この場合は静止画であるが、エントロピーの増大による不可逆性を感じているとすれば、その画像の中に心理的な時間の流れを感じ取っているのではないかと考える。このように考えると、画像AやDによって、感性による判断が攪乱されたとするならば、その原因として、この心理的な時間の影響も考えることができる。

著者の主観によって観察すると、図5.10の画像F, G, HおよびIの画像からは、時間的な動きを感じることができるようになるが、画像AやDからはそうした動きは感じられない。こうしたことが、これらの画像の感性量を引き下げた考えることもできる。更に、もし、今回のような静止画の比較に、このようなこのような心理的な時間が存在すると仮定した場合は、その時間の向きがどの方向へ向かっているのか、という議論も可能となる。即ち、白と黒の画素の切り替わる周波数を考えたときに、1列、1行ごとに感じるのか、あるいは複数列、行ごとに感じるのかどうか。また、その方向は右からなのか左からなのか、あるいは斜め方向なのかなど、様々考えることができる。今回の結果からは、計算方

法(e)が3種類の言語表現による感性量に対して最も相関係数が高かったが、このことから、心理的な時間は、2次元平面上に各画素から放射状に経過する、というような考え方も可能となる。しかし、このような心理的な時間の存在に関する詳細な議論は今後の検討課題とする。

### 7. 3 第7章のまとめ

本章では、本研究の分野の将来への方向性について議論した。ここではあえて、主観的で、飛躍的な考えも含めて議論したが、いずれにしても、本論文で取り上げた、「エントロピーと感性に関する研究」は始まったばかりで、著者のみの研究ではとても解明できないことが多くあると考えている。もし、本論文が、他分野の研究領域の様々な研究者に対して、エントロピーと感性量の関係に関する研究に関心を持ってもらえるきっかけになることができれば、非常に幸いなことだと考える。

## 第 8 章

## 結 論



## 8. 1 本論文の概要

本論文によって検討した内容と結果について、次のようにまとめる。

序論および第2章において次のことを議論した。

エントロピーは、クラウジウスによる熱力学のマクロ的解釈による定義から始まって、ボルツマンによる熱力学のミクロ的な解釈およびシャノンによる情報理論における解釈など複数の解釈が可能であり、これまでの歴史的な議論の過程を見ても、統一的な解釈としてのエントロピーの本質的な意味を理解するのは非常に難しい。これは、温度、圧力や体積のように、人間が五感から得られる情報を使って直感的に理解できるのとは違って、クオリアやアフォーダンスのように様々な事象を経験して感じ取ることができるものである可能性があり、そのため、感覚器に頼ったエントロピーの概念を表現する手段が無く、これまでは、数式による論理的な解釈のみに頼らざるを得なかったことが原因ではないかと考えた。

そこで、エントロピーを人間の感覚、すなわち感性によって認識させる事ができれば、エントロピーの本質的な意味を理解できるのではないかと考えた。温度や体積の場合は、実際に物質を触らせて、人間の感覚器からの情報と同時に「熱い」「冷たい」や「大きい」「小さい」などの言葉によって説明することで、その概念を理解させられる。同様に、エントロピーの増減を、分子運動のアニメーションを使って、エントロピー値の変化に応じてその分子の速度や領域の広さの変化を直接見せながら、適切な言語表現を使って説明する表現ができればエントロピーに対する理解がより深まるのではないかと考えた。

第3章では、その言語表現に着目し、まず、これまで啓蒙書や教科書などに使われてきたエントロピーの概念を表現する言語表現を検証した。そして、例えばこれまで一般的にエントロピーの概念を表現すると考えられてきた「乱雑さ」は、温度変化によって変化するエントロピーの増減を表現できるが、体積変化によるエントロピーの増減は表現できない。また、同様に一般的に使われている「曖昧さ」は体積変化によって変化するエントロピーの増減は表現できるが、温度によって変化するエントロピーの増減は表現できないのではないかと、という仮説を立てた。

第4章では、上記の仮説を検証する実験を行った。実験は、エントロピーの異なる2種類のパターンの分子運動のアニメーションを見せながら、選んだ数種類の言語表現について、どちらが強く感じるかを問う一対比較実験を行い、それによって得られた感性量と分子運動から求まるエントロピー値との相関分析を行っ

た。その結果、「乱雑さ」や「ぼやけた感じの度合い」といった、これまで啓蒙書などに一般的に用いられてきた表現が、それぞれ「強度依存エントロピー」と「容量依存エントロピー」といったエントロピー概念の一部に偏って相関していることが分かった。このことから、これらの表現が感性的にはエントロピー概念を十分には表現していないという第3章の仮説が裏付けられた。また、「捕まえにくさ」については、その判断は感性によるものではなくて、論理的な思考が働く可能性が示唆された。

第5章においては、視覚表現として、静止画である白黒2値画像を使って、いくつかの2値画像のパターンに対して、アニメーションの比較でも用いた数種類の言語表現による一対比較実験を行った。それらの言語表現によって得られる各パターンの感性量と、2値画像から得られる感性量について、2値画像から計算によって得られる5通りのエントロピー値計算手法をパラメーターにして比較した。その結果、言語表現の違いによって、2値画像から受ける感性量に大きな違いが確認され、特徴的なパターンを意図的に作り出したパターンについては、感性量の順位比較において全く異なった順位となった。そこで、エントロピーの論理的な概念によって恣意的に用意した2値画像を排除し、自然界に存在し得る自然な画像パターンによってそれぞれ「拡散の度合い」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」の言葉によって感じる感性量を比較したところ、これら3つの言葉の間の相関性は非常に高かった。このことから、このような、自然性のある配列による2値画像の比較に働いた感性は、エントロピーの本質的な意味に基づいたものである可能性が高いと考えられる。以上より、エントロピーの本質を理解するということは、これらの画像や、言語表現が共通に持つ概念を理解することに他ならず、したがって、エントロピーの本質的な意味を理解するためには、これらの表現についてそれぞれの表現が表現することができる事象を全て感じることで得られるのではないかと考えた。

第6章では、このような考えに基づいて、実際に熱力学の授業において、数式による理論的な説明と同時に、分子運動アニメーションといくつかの言語表現を用いて説明することで、受講者の感性に訴えることでエントロピーの本質の理解の向上を目指した。本授業では、ゲーム感覚のアニメーションを使ったり、本研究で事前に行った感性量を計る実験も行ったりして、あらゆる感覚を使ってエントロピーの大小を比較させる体験をさせた。授業後のアンケートでは、エントロピーに対する理解が深まったとする結果が得られたが、あくまでも主観的評価で

あるので、本当にエントロピーの概念の本質的な理解がされたかどうか、といった検証まではできてはいない。しかし、これについては、例えば温度や圧力であっても、人間が感覚を通してそれらの本質を完全理解しているかどうかといった問題は検証は難しいように、今後の検討課題として続けていくべき難しい課題であると考え。一方で、この結果は、様々な経験を通して知ることができるクオリアやアフォーダンスなどの本質的な概念を得とくするプロセスと同様に、エントロピーについても、様々な表現方法を通して、その根底に潜むエントロピーの本質的な意味を理解することができる可能性を示唆したものであることに違いはないと考える。また、エントロピーを理解できたと感じる適切な言語表現を選ばせるアンケートの結果、「捕まえにくさ」が最も評価が高かった。感性量に関する相関分析の結果も良い結果であったので、「捕まえにくさ」は、エントロピーの本質的な意味を論理的にも感性的にも表現できる言語表現として比較的に適しているといえる。

第7章では、今後の展望として、本研究の分野の将来への方向性について議論した。はじめに今後の予定として、マクスウェルの速度分布を再現したアニメーションによる実験の計画について記した。また、人間の知覚心理量とエントロピーに関する議論として、人間の知覚自体がエントロピーを感じている可能性について述べ、その影響について論じた。更に、時間と空間に関する人間の感性とエントロピーの関係について述べた。1つの可能性として、人間は、時間と空間は区別することなく、同じ次元および同じ方向のものだと感じている可能性について議論した。このように、時間の概念を人間がどのように感じているかを探ることは、非常に興味深く、今後の検討課題である。

## 8. 2 まとめ

本論文で明らかにした事項を以下にまとめる。

(1)これまで、「乱雑さ」「無秩序さ」「曖昧さ」および「ぼやけた感じの度合い」等の言語表現は、一般的にエントロピーの概念を表現する言葉として漠然と用いられてきたが、その適切さについての議論や定量的な検証がされているとは言えなかった。そこで、これらが適切な表現であるのかどうかを調べるための分子運動アニメーションを使った心理実験を行った。その結果、これらの言語表現がエントロピーの変化を完全に表現したものではない事が分かった。即ち、「乱雑さ」や「無秩序さ」等は温度変化によるエントロピーの変化(強度依存エントロピー)

については表現できているが、容積変化によるエントロピー変化（容量依存エントロピー）については表現できていない。また、「曖昧さ」や「ぼやけた感じの度合い」等は容積変化によるエントロピー変化（容量依存エントロピー）については表現できているが、温度変化によるエントロピーの変化（強度依存エントロピー）については表現できていない。

(2)これまでに、静止画としての2値画像のエントロピー値を計算する手法は数々あるが、人間がその画像を見た視覚情報から感じるエントロピーとの相関性については検証されてこなかった。そこで、9種類の白黒2値画像を用いた心理実験を行い、5種類のエントロピー計算方法で計算した値と、3種類の言語表現による感性量との相関分析を行った。その結果、言語表現の違いによって、2値画像から受ける感性量に大きな違いが確認され、単純で特徴的なパターンを意図的に作り出した画像については、感性量の順位が全く異なった位置となった。そこで、エントロピーの論理的な概念によって恣意的に作成した2値画像を排除し、自然界に存在し得るような自然な画像パターン同士の比較によってそれぞれ「拡散の度合い」、「無秩序さ」および「捕まえにくさ」によって感じる感性量を比較した。その結果、これら3つの言葉の間の相関性は非常に高かった。このことから、このような、自然性のある2値画像の比較に働いた共通の感性の存在が認められた。そして、それこそが、エントロピーの「本質的な意味」あるいは「質感」である可能性が高い。さらに、これらの3つ言語表現による感性量の全てと最も相関性が高かったエントロピーの計算方法は、2つの画素間の距離を基準とした計算方法であった。

(3) 熱力学の授業において、数式による理論的な説明と同時に、分子運動アニメーションといくつかの言語表現を用いて説明することで、受講者の感性に訴えることでエントロピーの本質の理解の向上を目指した授業を実践した。本授業では、ゲーム感覚のアニメーションを使ったり、本研究で事前に行った感性量を計る実験も行ったりして、あらゆる感覚を使ってエントロピーの大小を比較させる体験をさせた。授業後のアンケートでは、エントロピーに対する理解が深まったとする結果が得られた。この結果は、様々な経験を通して知ることができるクオリアやアフォーダンスなどの本質的な概念を得とくするプロセスと同様に、エントロピーについても、様々な表現方法を通して、その根底に潜むエントロピーの本質的な意味を理解することができる可能性を示唆したものであるといえる。また、エントロピーを理解できたと感じる適切な言語表現を選ばせるアンケートの結果、

「捕まえにくさ」が最も評価が高かった。感性量に関する相関分析の結果も良い結果であったので、「捕まえにくさ」は、エントロピーの本質的な意味を論理的にも感性的にも表現できる言語表現として比較的に適しているといえる。

# 謝 辭

## 謝 辞

はじめに、本論文をまとめるにあたり、本研究の指導教授である筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻の宇津呂武仁先生におかれましては、入学の手続きから研究および論文のまとめ方に至るまで、丁寧なご指導を賜りました。特に、社会人である私は仕事に忙殺されておりましたので、なかなか思うように論文執筆が進まず、一時は博士号取得を断念しかけたことが、辛抱強く励ましていただきましたおかげで、本論文の完成にこぎ着けることができました。いろいろご面倒をおかけしてしまいましたこととお詫び申し上げますと共に、ここに、多大なる感謝の意を述べさせていただきます。また、同大学教員であられる、葛岡英明教授、丸山勉教授、古賀弘樹准教授および矢野博明准教授の先生方におかれましては、お忙しい中、論文をまとめるに当たって副査としてご指導賜りましたこと、大いなる感謝を申し上げます。

職場においては、神奈川工科大学学長であられる小宮一三先生におかれましては、社会人博士課程入学のご相談にあがったときに、私のエントロピーの研究に対してもご興味を示されて、ご理解をいただき、是非学位をまとめなさい、と快く教員と学生の二足のわらじを認めていただきました。ここに、深い感謝の意をお伝えいたします。

更に、私の学生時代の恩師であり、また技術職員、助手・助教時代の上司でもあった神奈川工科大学名誉教授であられる小口幸成先生におかれましては、この研究テーマの立ち上げ時にいろいろアドバイスをいただきました。私が気まぐれで始めた、何のためになるのかも分からない本研究テーマを、否定することなく、面白いのではないかと励ましてくださいました。ここまでやってこられたのも初期のこのようなご教示があったからだと思っております。いつも公私共に大変お世話になっておりますが、それらも含めて、ここに、大いなる感謝の意を述べさせていただきます。

最後に、大学院の入学という私のわがまを承諾し、特に後半は、休日も職場に行くことを許してくれて、私の学業および研究に対して大いなる理解を示してくれて励ましてくれた私の妻、孝江と、息子の世良に、敬愛の念と、心よりの感謝の意を表します。

2015 年 3 月

佐藤智明

## 参考文献



## 参考文献

- 1) 向坊隆, 青木昌治, 関根泰次: "エネルギー論", (株) 岩波書店, 1976.
- 2) ジェレミー・リフキン: "エントロピーの法則ー地球の環境破壊を救う英知ー", 祥伝社, 1990.
- 3) 山口幸夫: "エントロピーと地球環境", 七つ森書館, 2001.
- 4) 中塚勉, 土本信孝, 毛利邦彦: "環境にやさしい新エネルギーの基礎", 森北出版 (株), 2007.
- 5) P. W. Atkins: "THE SECOND LAW", Scientific American Books, 1984.
- 6) Andreas Greven, Gerhard Keller, Gerald Warnecke: "Entropy", Princeton University Press, 2003.
- 7) J. D. Fast and F. L. Stumpers: Philips tech. Rev., 18, pp.201-205, 1956.
- 8) J. D. Fast: "Entropy - The significance of the concept of entropy and its applications in science and technology - ", N.V. Phillips, 1968.
- 9) E.T.Jaynes: "Information Theory and Statistical Mechanics",  
The Physical Review, 106, 4, pp.620-630, 1957.
- 1 0) Leon Brillouin: "Science and Information theory", Dover Publications,  
INC., pp.159-161, 1962.
- 1 1) William Thomson: "Kinetic theory of the dissipation ", NatureIX,  
pp.441-444, 1874.
- 1 2) E. E. Daub: "Maxwell's Demon", Stud. Hist. phli. Sci., 1, pp. 213-227,  
1970.
- 1 3) P. M. Heimann: "Molecular Forces Statistical Representation and  
Maxwell's Demon",Stud. Hist. Phil. sci., 1, pp.189-211, 1970.
- 1 4) M. J. klein: "Maxwell, His Demon and The Second Law of  
Thermodynamics",Am. Sci., 58,pp.84-97, 1970.
- 1 5) L. Brillouin: "Life, Thermodynamics and Cybernetics", Am. sci. 37,  
pp.554-568, 1949.
- 1 6) J. Rothstein:"Infomation, Measurement and Quantum Mechanics",  
Science, 114, pp.171-175, 1951.
- 1 7) K. Denbigh: "How Subjective is Entropy?", Chem. Brit., 17,  
pp.168-185,1981.

- 
- 1 8) A. M. Weinberg: "On the Relation Between Information and Energy Systems", *Interdisciplinary Sci. Rev.*, 7, pp.47-52,1982.
- 1 9) Hardey Leff and Andyrew Rex: "MAXWELL'S DEMON – Entropy", *Information Computing*, Adam Hilger Bristol, 1990.
- 2 0) 都築卓司: "マックスウェルの悪魔－確率から物理学へ－", (株)講談社, 2002.
- 2 1) L. Szilard: "On the decrease of Entropy in a Thermodynamic System by the Intervention of Intelligent Beings", *Behavioral Science*, 9, pp.301-310,1964.
- 2 2) L. Brillouin: "Maxwell's demon cannot operate: Information and entropy. I", *J. Appl. Phys.*, 22, pp.334-337,1951.
- 2 3) D. Gabor: "Light and Information", *Progress in Optics*, 1, pp.111-153,1964.
- 2 4) R. C. Raymond: "The Well-informed Heat Engine", *Am. J. Phys.*, 19, pp.109-112,1951.
- 2 5) C. Finfgeld and S. Machlup: "Well-informed Heat Engine -Efficiency and Maximum Power-", *Am. J. Phys.*, 28, pp.324-326,1960.
- 2 6) P. Rodd: "Some Comments on Entropy and Information", *Am. J. Phys.*, 32, pp.333-335,1964.
- 2 7) J. M. Jauch and J. G. Baron: "Entropy, Information and Szilard's Paradox", *Helv. Phys. Acta*, 45, pp. 220-232,1972.
- 2 8) O. Costa de Beauregard and M. Tribus: "Information Theory and Thermodynamics", *Helv. Phys. Acta*, 47, pp.238-247,1974.
- 2 9) C. H. Bennett: "Logical Reversibility of Computation", *IBM J. Res. Dev.*, 17, pp.525-532,1973.
- 3 0) R. Raing: "Maxwell's Demon and Computation", *Phil. Sci.*, 41, pp.171-178,1974.
- 3 1) R. Landauer: "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process", *IBM J. Res. Dev.*, 5, pp.183-191,1961.
- 3 2) C. H. Bennett: "The Thermodynamics of Computation -a review", *Int. J. Theor. Phys.*, 21, pp.905-940,1982.
- 3 3) W. H. Zurek: "Maxwel's Demone, Szilard's Engine and Quantum

- Measurements", *Frontiers of Nonequilibrium Statistical Physics*, pp.151-161,1984.
- 3 4) R. Landauer: "Computation -A Fundamental Physical View-", *Phys. Scr.*, 35, pp.88-95,1987.
- 3 5) E. Lubkin: "Keeping the Entropy of Measurement -Szilard Revisited-", *Int. J. Theor. Phys.*, 26, pp.523-535,1987.
- 3 6) A. F. Rex: "The Operation of Maxwell's Demon in a Low Entropy System", *Am. J. Phys.*, 55, pp.359-362,1987.
- 3 7) C. H. Bennett: "Notes on the History of Reversible Computation", *IBM J. Res. Dev.*, 32, pp.16-23,1988.
- 3 8) Serreli, V., Lee, C-F., Kay, E. R. & Leigh, D. A. A: "molecular information ratchet", *Nature*, 445, pp.523-527, 2007.
- 3 9) S.Toyabe, T.Sagawa, M.Ueda, E.Muneyuki & M.Sano: "Experimental demonstration of information to energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality", *Nature Physics* 6, pp.988-992, 2010.
- 4 0) 若菜博: "エントロピーの教育内容構成と教材化のためのノート", 教授学の探究, 4, pp. 73-88, 1986.
- 4 1) 飯田洋治: "分子のそろった運動と乱雑な運動", 理科教室, 3月号, 2002.
- 4 2) 飯田洋治: "分子のそろった運動と乱雑な運動(2)", 理科教室, 9月号, 2002.
- 4 3) 松尾隆祐: "熱力学の授業", 熱測定, 32, 1,p.20, 2005.
- 4 4) 前田高弘: "表象としての経験", 科学哲学, 38, 2, pp.123-138, 2005.
- 4 5) 篠原成彦: "クオリアの疑わしさについて", 信州大学人文学部人文科学論集人間情報学科編, 41, pp.37-46,2007.
- 4 6) 村田徳幸: "科学的アプローチによるクオリア概念の再考", 東京都立大学哲学会哲学誌, 49, pp.37-55, 2007.
- 4 7) ドナルド・ノーマン: "誰のためのデザイン - 認知科学者のデザイン原論 -", (株)新曜社, 1990.
- 4 8) 佐々木正人: "アフォーダンス - 新しい認知の理論 -", (株)岩波書店, 1994.
- 4 9) 三宅なほみ: "マルチメディアと教育", *AREA Mook*8, 1996.
- 5 0) 三宅なほみ: "学習科学とテクノロジー", 放送大学教育振興会, 2003.
- 5 1) 佐藤智明, 永岡慶三, 小口幸成: "e ラーニング CG コンテンツを利用した

- オットーサイクル原理の学習”，工学教育, 56, 4, pp.52-57, 2008.
- 5 2) 佐藤智明：“工学教育のための CG アニメーションコンテンツ”，非破壊検査, 61, 5, pp.210-215, 2012.
- 5 3) 佐藤幸男，加藤哲孝：“多面体の情報量と視方向評価”，電子情報通信学会論文誌 D・II，J75-D2, No.8, p.1346, 1992.
- 5 4) 石川尋代，佐藤幸男：“多面認識における心理量と物体エントロピーの関係について”，電子情報通信学会論文誌 D・II，J86-D-2, No.1, p.111, 2003.
- 5 5) 坂谷尚哉，川澄未来子，古橋武：“視覚情報の物理量と認知情報量との関係に関する基礎的考察”，第 17 回ファジイシステムシンポジウム講演論文集 p.655, 2001.
- 5 6) ファースト：“エントロピー”，好学社，1969.
- 5 7) Ilya Prigogine, Dilip Kondepudi: " MODERN THERMODYNAMIQUE", Editions Odile Jacob, 1999.
- 5 8) イリヤ・プリゴジン，ディリプ・コンデプディ：“現代熱力学 - 熱機関から散逸構造へ - ”，(株)朝倉書店，2001.
- 5 9) Dilip Kondepudi: "Introduction to Modern Thermodynamics", John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- 6 0) 久保亮五：“統計力学”，共立出版（株），1952.
- 6 1) 原島鮮：“熱力学・統計力学”，(株)倍風館，1966.
- 6 2) バークレー物理コース編：“統計物理”，丸善（株），1970.
- 6 3) 阿部龍蔵：“統計熱力学”，放送大学教育振興会，1994.
- 6 4) 和田純夫：“熱・統計力学のききどころ”，(株)岩波書店，1995.
- 6 5) 岡部豊，堂寺知成：“エネルギーと熱”，放送大学教育振興会，2003.
- 6 6) 為近和彦：“ビジュアルアプローチ 熱・統計力学”，森北出版（株），2008.
- 6 7) 鎌田清一郎：“画像処理”，サイエンス社，2003.
- 6 8) 半谷精一郎，岡本淳，宮内一洋：“画像の局所的なエントロピーを考慮した白黒静止画の画質評価尺度 WSNR”，テレビジョン学会誌, 49, 8, pp.1078-1086, 1995.
- 6 9) 波多野誼余夫，大浦容子，大島純：“学習科学”，放送大学教育振興会，2004.
- 7 0) 藤田隆眞，山田晃子：“視覚言語の理解のための教材研究”，山口大学教育学部附属教育実践センター研究紀要，18, pp.31-42, 2004.
- 7 1) ファースト：“エントロピー”，好学社，1969.

- 7 2) 谷下市松：“工学基礎熱力学”，(株) 裳華房，1971.
- 7 3) 松村篤躬，越後雅夫：“熱力学の計算法”，東京電機大学出版，1971.
- 7 4) P. W. ブリッジマン：“熱とエントロピー—熱力学の本性について—”，東京図書 (株)，1973.
- 7 5) 一色尚次，北山直方：“わかりやすい熱力学”，森北出版 (株)，1974.
- 7 6) 宮部英也，斉藤孟，中村博，渡部康一，小口幸成，眞下俊雄，高村淑彦：“基礎力学演習 工業熱力学”，実教出版 (株)，1976.
- 7 7) 小出昭一郎，大内昭，村上悟：“エネルギー”，(株) 倍風館，1977.
- 7 8) 北山直方：“図解演習熱力学”，(株) オーム社，1979.
- 7 9) 青木統夫，白岩謙一：“力学系とエントロピー”，共立出版 (株)，1985.
- 8 0) アマルティア・セン：“合理的な愚か者”，(株) 勁草書房，1989.
- 8 1) 細野敏夫：“エントロピーの科学”，(株) コロナ社，1991.
- 8 2) P.W.アトキンス：“エントロピーと秩序”，日経サイエンス社，1992.
- 8 3) 池上雄作：“化学熱力学”，放送大学教育振興会，1995.
- 8 4) 富永昭：“熱音響工学の基礎”，(株) 内田老鶴圃，1998.
- 8 5) アマルティア・セン：“不平等の経済学”，東洋経済新報社，2000.
- 8 6) 小暮陽三：“ゼロから学ぶ熱力学”，(株) 講談社サイエンティフィク，2001.
- 8 7) 竹内薫：“熱とはなんだろう”，(株) 講談社，2002.
- 8 8) 石原敦，飽本一裕：“ゼロからスタート・熱力学”，日新出版 (株)，2002.
- 8 9) 富永昭：“誕生と変遷に学ぶ熱力学の基礎”，(株) 内田老鶴圃，2003.
- 9 0) 西野友年：“ゼロから学ぶエントロピー”，(株) 講談社サイエンティフィク，2004.
- 9 1) 関本謙：“ゆらぎのエネルギー論”，(株) 岩波書店，2004.
- 9 2) 橋元淳一郎：“単位が取れる熱力学ノート”，(株) 講談社，2005.
- 9 3) 小口幸成，伊藤定祐，高石吉登，矢田直之，棚谷吉朗，佐藤春樹，洞田治：“熱力学”，(株) 朝倉書店，2006.
- 9 4) 吉田善一：“酒井佐保の熱学教科書”，(株) 富山房インターナショナル，2007.
- 9 5) 佐藤智明，永岡慶三，小口幸成：“熱力学的エントロピー値とエントロピー概念の言語表現による心理量の順位相関”，日本認知科学会第 24 回大会，2007.
- 9 6) 平田邦男：“BASIC による物理”，共立出版 (株)，1983.

- 97) 島田政輝：“マイコンによる分子運動のシミュレーション(I)－単原子分子の運動について－”，物理教育, 31, 4, pp.213-216, 1983.
- 98) 島田政輝：“マイコンによる分子運動のシミュレーション(II)－2 原子分子の運動について－”，物理教育, 32, 3, pp.131-134, 1984.
- 99) 稲垣知宏，太田朱美，佐々井祐二，隅谷孝洋，長登康，中村純，平方正樹，福永優：“シミュレーションを用いた物理教育”，計算工学講演会論文集, 9, pp.721-724, 2004.
- 100) 和田正信：“物理教育におけるマイコンシミュレーション－その効果と問題点－”，日本物理学会誌, 40, 1, pp.6-8, 1985.
- 101) 佐藤智明：“立体視 3DCG アニメーションを利用したエンジンメカニズムの教育用コンテンツ”，工学教育, 56, 6, pp.102-106, 2008.
- 102) 大山正：“視覚心理学への招待－見えの世界へのアプローチ－”，(株)サイエンス社, 2000.
- 103) 相場覚，鳥居修晃：“知覚心理学”，放送大学教育振興会, 2001.
- 104) 道又爾，北崎充晃，大久保街亜，今井久登，山川恵子，黒沢学：“認知心理学－知のアーキテクチャを探る－”，(株)有斐閣, 2003.

## 研究業績目録

## 研究業績目録

### 1. 査読付き学術雑誌論文

- (1) 佐藤智明, 菅沼睦, 「エントロピー概念の表現方法に関する検討 (分子運動動画の熱力学的エントロピー値と言語表現による感性量との相関性)」, 日本感性工学会論文誌, Vol. 12, No. 2, 2013, pp. 303-309
- (2) 佐藤智明, 菅沼睦, 「2 値画像エントロピー値と言語表現による感性量との相関性」, 日本感性工学会論文誌, Vol. 12, No. 4, 2013, pp. 499-509
- (3) 佐藤智明, 菅沼睦, 「分子運動アニメーションと適切な言語表現を使ったエントロピー概念の説明方法の検討」, 工学教育 (日本工学教育協会誌: 論文), Vol. 62, No. 5, 2014, pp. 39-44

### 2. 国際会議発表論文

- (1) Tomoaki Sato, Mutsumi Suganuma, " Verbal Expression of the Entropy Concept ", Tomoaki Sato, Mutsumi Suganuma, Procedia - Social and Behavioral Sciences (Proc. of The 9th International Conference on Cognitive Science in Malaysia), Vol. 97, 2013, pp. 443-447
- (2) Tomoaki Sato, Mutsumi Suganuma, " Consideration of Expression Method of the Entropy Concept ", Proc. of the International Conference on Kansei Engineering and Emotion Reserch, 2014, (CD-ROM, No.12, 11 Pages)

### 3. 紀要・研究報告等

- (1) 佐藤智明, 永岡慶三, 小口幸成, 「エントロピー概念の表現手法についての考察 ―言語表現および視覚表現と心理量との関係についての認知科学的検討―」, 神奈川工科大学研究報告, B 編, Vol. 30, 2006, pp. 5-14
- (2) 佐藤智明, 「分子運動の C G アニメーションコンテンツを用いたエネルギー等分配法則の説明」, 工学教育 (日本工学教育協会誌: 事例紹介), Vol. 62, No. 5, 2014, pp. 65-70

### 4. 国内講演会等口頭発表論文

- (1) 佐藤智明, 永岡慶三, 小口幸成, 「エントロピー概念の言語表現 ―エントロピー概念の表現手法に関する認知科学的検討―」, 日本認知科学会第 23 回大



会講演論文集，2006，pp. 158-161

- (2) 佐藤智明，永岡慶三，小口幸成，「熱力学的エントロピー値とエントロピー概念の言語表現による心理量の順位相関」，認知科学会第 24 回大会講演論文集，2007，pp. 54-57
- (3) 佐藤智明，「エントロピー概念の言語表現：熱力学的エントロピー値とエントロピー概念の言語表現による心理量の相関関係」，日本認知心理学会大 7 回大会講演論文集，2009，p. 29
- (4) 佐藤智明，菅沼睦，「エントロピー概念の表現方法に関する検討（熱力学的エントロピー値と言語表現による感性量との相関性）」，第 14 回日本感性工学会大会講演論文集，2012，CDROM-B7-3
- (5) 佐藤智明，菅沼睦，「2 値画像エントロピー値と言語表現による感性量との相関性」，第 15 回日本感性工学会大会講演論文集，2013，CDROM-D31